

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



**MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO 2016-2017**

**ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO Y
MODELIZACIÓN DE LOS DESPRENDIMIENTOS
ROCOSOS EN LA CIUDAD DE SEGOVIA Y SU
ENTORNO**

Isabel del Portillo Aceituna

Junio 2017

Tutores:

Luis Miguel Tanarro García

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física.

Universidad Complutense de Madrid.

Andrés Díez Herrero

Área de Investigación en Peligrosidad y Riesgos Geológicos.

Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica.

Instituto Geológico y Minero de España.

Análisis geomorfológico y modelización de los desprendimientos rocosos en la ciudad de Segovia y su entorno

Resumen: El emplazamiento de la ciudad de Segovia entre dos valles de tipo cañón, caracterizados por paredes verticales o escarpadas y fondos planos, ha favorecido la ocurrencia de procesos gravitacionales, entre los cuales los desprendimientos de rocas son de los más recurrentes.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es estudiar y analizar los desprendimientos de rocas que afectan al entorno de la ciudad de Segovia, con la finalidad de elaborar una cartografía de la susceptibilidad al alcance de este fenómeno natural. Para ello, el TFM, se estructura en dos partes. En la primera, se realiza un inventario que recoge la localización del origen de cada desprendimiento y, a partir de éste, un análisis, mediante el uso de diferentes TIGs (SIG ArcGIS, CAD MicroStation, Adobe Illustrator entre otras), de los factores condicionantes (litología, pendiente, orientación, geomorfología) y de algunos factores desencadenantes, mediante el tratamiento estadístico de las precipitaciones y temperaturas de tres eventos recientes. En el análisis de los factores desencadenantes se han utilizado tres DEM, para evaluar las posibles diferencias en cuanto a su diferente resolución. En la segunda parte, se lleva a cabo la modelización preliminar de la trayectoria y alcance de los desprendimientos, utilizándose el programa de simulación Rockyfor3D.

Los resultados muestran la caracterización litológica y morfotopográfica en la que ocurren los desprendimientos, y además la aproximación prospectiva mediante la simulación ha permitido elaborar un mapa de susceptibilidad al alcance de los bloques o rocas, y detectar aquellos bienes y áreas más expuestas a este fenómeno natural.

Palabras clave: Desprendimientos, Inventario, Modelos Digitales de Elevaciones, Tecnologías de la Información Geográfica, Simulación, Rockyfor3D, Segovia.

Abstract: The city of Segovia, located between two canon-type valleys which have as their main features steep walls and flat bottoms, has favored the occurrence of gravitational processes among which rock-falls are the most frequent.

The purpose of this Master's thesis is to study and analyses the impact of rock-falls in this city with a view to drawing up a susceptibility map of this natural phenomenon. To do so, this work is structured in two parts. In the first one, an inventory is carried out that collects the location of the origin of each rock fall and, from this, it has been done an analysis of the trigger factors (lithology, slope, orientation, geomorphology), through the use of different TIGs (ArcGIS SIG, MicroStation CAD, Adobe Illustrator among others), Also, some conditioning factors (precipitation and temperature) have been studied, through the statistical treatment of three recent events. In the analysis of the trigger factors, three DEMs were used to evaluate the possible differences in their resolution. In the second part, the preliminary modeling of the trajectory and reach of blocks is carried out, using Rockyfor3D simulation software.

Results show the lithologic and topographic characteristics in which rock falls are developed, and also the prospective approach by means of rockfall simulation has enabled us to elaborate a map of susceptibility to the reach of blocks or boulders and to detect those areas most exposed to this natural phenomenon.

Key words: Rock-falls, Inventory, Digital Elevation Models, Geography Information Technology, Simulation, Rockyfor3D, Segovia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo I: Planteamiento, área de estudio y objetivos	1
1.1. Delimitación del área de estudio	3
1.2. Estudios previos sobre los desprendimientos y otros fenómenos de ladera en el entorno de Segovia	5
1.3. Objetivos	7
Capítulo II: Los riesgos asociados a los desprendimientos de rocas.	
Consideraciones generales	9
Capítulo III: Materiales y metodología	13
3.1. Fuentes y materiales de partida	14
3.2. La elaboración del inventario de los desprendimientos de roca	15
3.2.1. Los factores topográficos	18
3.2.1.1. Modelo Digital de Elevación a partir del Mapa Topográfico a escala 1:5.000	18
3.2.1.2. Modelo Digital de Elevación a partir del LiDAR 5×5 m	19
3.2.1.3. Modelo Digital de Elevación a partir del vuelo fotogramétrico digital con Vuelo LiDAR	20
3.2.2. Los factores litológicos y geomorfológicos	24
3.2.2.1. La litología	24
3.2.2.2. La geomorfología	26
3.3. La obtención y tratamiento de los factores desencadenantes de carácter meteorológico.	29
3.4. La preparación de los mapas para la simulación de los desprendimientos	29
3.4.1. El área potencial de los desprendimientos (release map).	31
3.4.2. El mapa de las características del suelo potencialmente afectado por los desprendimientos (soil type map).	34
3.4.3. Generación de los mapas raster.	36
Capítulo IV: Resultados. Reconocimiento y análisis de los desprendimientos	38
4.1. El mapa-inventario de los desprendimientos y la tabla de atributos asociada.	39
4.2. Las características litológicas de los desprendimientos.	39
4.3. Las características topográficas de los desprendimientos: pendientes y orientaciones.	41
4.4. Las características geomorfológicas de los desprendimientos.	46
4.5. Las características meteorológicas de algunos desprendimientos recientes.	47
4.5.1. Desprendimiento en el meandro del Santuario de Nuestra Señora de La Fuencisla.	47
4.5.2. Desprendimiento en el paraje de la Cuesta de los Hoyos.	49
4.5.3. Desprendimiento en el paseo del arroyo de Clamores.	49
Capítulo V: Resultados. Modelización de los desprendimientos	51
5.1. Ejecución del programa de simulación Rockyfor3D: Parámetros de entrada y salida	52
5.2. Resultados procedentes de la simulación	55
Capítulo VI: Conclusiones	61

BIBLIOGRAFÍA	65
Anexo	68

RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS

RELACIÓN DE TABLAS

[Tabla 1: Relación de datos de partida y su fuente.](#)

[Tabla 2: Relación de posibles medidas que indican la altura de los obstáculos que cubren una ladera \(MOH\).](#)

[Tabla 3: Los tipos de suelo utilizados por Rockyfor3D.](#)

[Tabla 4: Relación de litologías según número de desprendimientos.](#)

[Tabla 5: Resumen de los datos de pendiente obtenidos a partir de diferentes métodos.](#)

[Tabla 6: Resumen del número de desprendimientos por rangos de orientación.](#)

RELACIÓN DE FIGURAS

[Figura 1: Localización del área de estudio a nivel administrativo.](#)

[Figura 2: Vista tridimensional sobre el Modelo Digital de Elevaciones que muestra la altitud en el entorno de Segovia.](#)

[Figura 3: Mapa base o topográfico en el que se incluyen elementos expuestos: edificios relevantes, sendas y caminos en el entorno de Segovia.](#)

[Figura 4: Portada de la excursión científico-didáctica “A Todo Riesgo” que ilustra sobre el desprendimiento ocurrido el 26 de diciembre de 2013 en el paseo del Clamores.](#)

[Figura 5: Resumen de algunos parámetros que condicionan los desprendimientos.](#)

[Figura 6: Ejemplo de las trayectorias de bloques según la tipología de las laderas.](#)

[Figura 7: Diagrama que muestra la típica morfología de una vertiente tipo escarpe-talud.](#)

[Figura 8: Recopilación de noticias de prensa sobre desprendimientos ocurridos en Segovia, y su localización sobre la base del MTN25 del IGN.](#)

[Figura 9: Proceso metodológico para localizar el origen de los desprendimientos con apoyo de ortofotos y topografía.](#)

[Figura 10: Desprendimientos localizados con la herramienta “Google Street View”.](#)

[Figura 11: Evolución de un gran bloque desprendido por socavación lateral del río Eresma en San Marcos.](#)

[Figura 12: Proceso de elaboración de la red irregular de triángulos a partir de las curvas de nivel y cotas en el programa ArcGIS.](#)

[Figura 13: Pasos realizados para la elaboración de un DEM a partir del vuelo fotogramétrico digital con vuelo LiDAR.](#)

[Figura 14: Comparación visual de los Modelos Digitales de Elevación procesados en el software MicroStation.](#)

[Figura 15: Comparación de los mapas de pendientes obtenidos a partir de los diferentes Modelos Digitales de Elevación.](#)

[Figura 16: Proceso de transformación del sistema geodésico](#)

[Figura 17: Proceso de elaboración de una célula para aplicarla como patrón.](#)

[Figura 18: Proceso de georreferenciación del esquema geomorfológico.](#)

[Figura 19: Limpieza y creación de la topología aplicada al mapa geomorfológico.](#)

[Figura 20: Ejemplo de estilo de línea personalizada y célula aplicado como trama.](#)

[Figura 21: Esquema que muestra los parámetros de entrada para realizar la simulación con el software Rockyfor3D.](#)

[Figura 22: Medida de los bloques que se tomaron durante el trabajo de campo.](#)

[Figura 23: Estadísticas de la pendiente a partir del tratamiento individual de los puntos-desprendimientos.](#)

[Figura 24: Estadísticas de las pendientes obtenidas a partir del buffer de cada punto-desprendimiento.](#)

[Figura 25: Tabla de atributos de los escarpes con los parámetros que definen las propiedades físicas.](#)

[Figura 26: Tabla de atributos de las unidades geomorfológicas con los registros necesarios para la simulación.](#)

[Figura 27: Detalle del inventario donde cada uno de los registros de la base de datos representa un desprendimiento.](#)

[Figura 28: Mapa con las unidades geológicas comprendidas en el área de estudio.](#)

[Figura 29: Reclasificación de las pendientes considerando los dos umbrales.](#)

[Figura 30: Mapas que muestran la comparación de las orientaciones a partir de los MDE.](#)

[Figura 31: Histograma de frecuencia que muestra la acumulación de desprendimientos por pendientes.](#)

[Figura 32: Relación de dispersión entre orientaciones y pendientes.](#)

[Figura 33: Mapa geomorfológico del área de estudio.](#)

[Figura 34: Jerarquización de cauces a partir del método Strahler.](#)

[Figura 35: Datos diarios de precipitaciones y temperaturas para el desprendimiento acontecido en el meandro del Santuario de Nuestra Señora de La Fuencisla.](#)

[Figura 36: Datos diarios de precipitaciones y temperaturas para el desprendimiento acontecido en el paraje de la Cuesta de los Hoyos.](#)

[Figura 37: Datos diarios de precipitaciones y temperaturas para el desprendimiento acontecido en el arroyo de Clamores.](#)

[Figura 38: Jerarquía de los parámetros de entrada para realizar la simulación.](#)

[Figura 39: Interface del programa Rockyfor3D y los pasos seguidos para ejecutar la simulación.](#)

[Figura 40: Fichero Nr_passages abierto en el programa ArcGIS.](#)

[Figura 41: Mapa de susceptibilidad al alcance de los desprendimientos con \$d1 = 0,30\$.](#)

[Figura 42: Mapa de susceptibilidad al alcance de los desprendimientos con \$d1 = 0,70\$.](#)

[Figura 43: Mapa de zonificación de susceptibilidad en el entorno de Segovia.](#)

Capítulo I: Planteamiento, área de estudio y objetivos



Los procesos naturales que ocurren en la superficie terrestre constituyen una amenaza para el hombre, es decir, pueden afectar negativamente a sus estructuras y modos de vida. Cuando esto sucede, el proceso natural se transforma en *riesgo* debido a que es potencialmente peligroso para los seres humanos y puede causar daños y pérdidas. De este modo, puede decirse que el suceso en sí no es un riesgo; más bien un proceso natural se convierte en riesgo cuando amenaza los intereses humanos (Keller y Blodgett, 2007).

Dentro de la diversidad de peligros naturales (Ayala-Carcedo y Olcina, 2002), los desprendimientos de rocas, asociados a la dinámica de vertientes, pueden, por su naturaleza repentina, constituir un riesgo potencial. En este sentido, en el estudio de los riesgos naturales, con independencia del peligro natural, una de las primeras tareas que se realiza es la identificación e inventario de los procesos o fenómenos naturales que pueden significar una amenaza para un territorio, con el fin de conocer los elementos materiales y humanos más expuestos a dicho peligro. En esta tarea resulta de gran importancia analizar y cartografiar, por tanto, las características y condicionantes topográficos (pendiente, orientación, etc.), litológicos (tipos de rocas), geomorfológicos, meteorológicos, etc., que favorecen o desencadenan cualquier proceso natural. Este análisis es, además, la base para que las diferentes administraciones (gobiernos, protección civil, organizaciones no gubernamentales, etc.) puedan ejecutar medidas de mitigación, y llevar a cabo intervenciones de carácter predictivo, preventivo o correctora.

A partir de estas consideraciones, el objetivo de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es estudiar y analizar un peligro natural, en este caso, los desprendimientos de rocas que afectan al entorno de la ciudad de Segovia, con la finalidad de elaborar una cartografía de la susceptibilidad de este fenómeno natural.

1.1. Delimitación del área de estudio

La ciudad de Segovia se localiza en el borde suroccidental de la provincia de Segovia (40° 57'N, 4°07'O, 1003 m), aproximadamente en el centro de península Ibérica. En concreto, dentro del término municipal de Segovia, que presenta una superficie de 163,6 km², el área de estudio propiamente dicha se localiza en el sector nororiental del mismo (Figura 1). Y comprende, básicamente, la ciudad antigua de Segovia y su entorno más próximo (los arrabales y parte de la ciudad moderna), enmarcado, en conjunto, por los valles de los ríos Eresma y Clamores, y ocupando una extensión de 5,5 km².

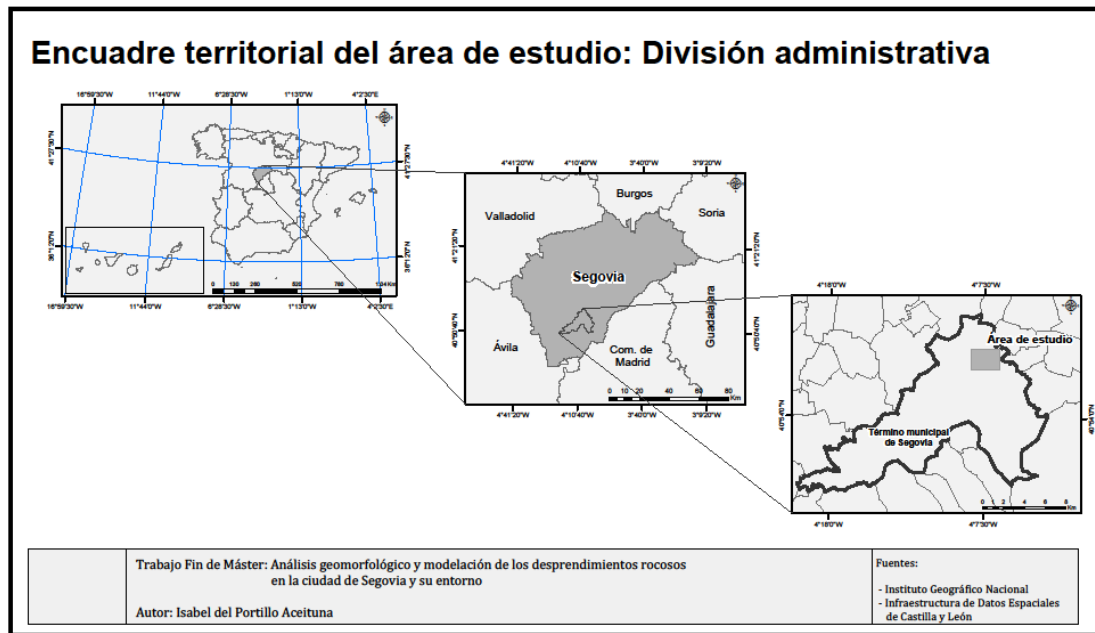


Figura 1. Localización del área de estudio a nivel administrativo.

La ciudad de Segovia se asienta en el piedemonte septentrional de la sierra de Guadarrama, y se muestra morfológicamente, como una amplia superficie de arrasamiento, cuya altitud desciende desde los 1.200 m en las faldas de la sierra hasta aproximadamente 1.000 m (Figura 2). En el entorno de Segovia, esta superficie está constituida, desde un punto de vista litológico, por rocas metamórficas (ortogneises glandulares) y rocas graníticas tardivariscas (monzogranitos-granodioritas), que enlazan o enrasan con sedimentos mesozoicos formados por materiales esencialmente carbonáticos (dolomías, margas, areniscas con cemento dolomítico) y terrígenos o detríticos (arenas, arcillas, gravas) (IGME, 1991). Estos materiales sedimentarios, que forman una estrecha franja de unos 3-4 km y de escaso espesor, aparecen en disposición

monoclinas, que determina un relieve en cuesta poco inclinada, separando las campiñas y páramos terciarios de la cuenca del Duero, de los relieves de la sierra de Guadarrama, elaborados sobre rocas cristalinas (Bullón, 1986; Díez-Herrero y Martín-Duque, 2005).

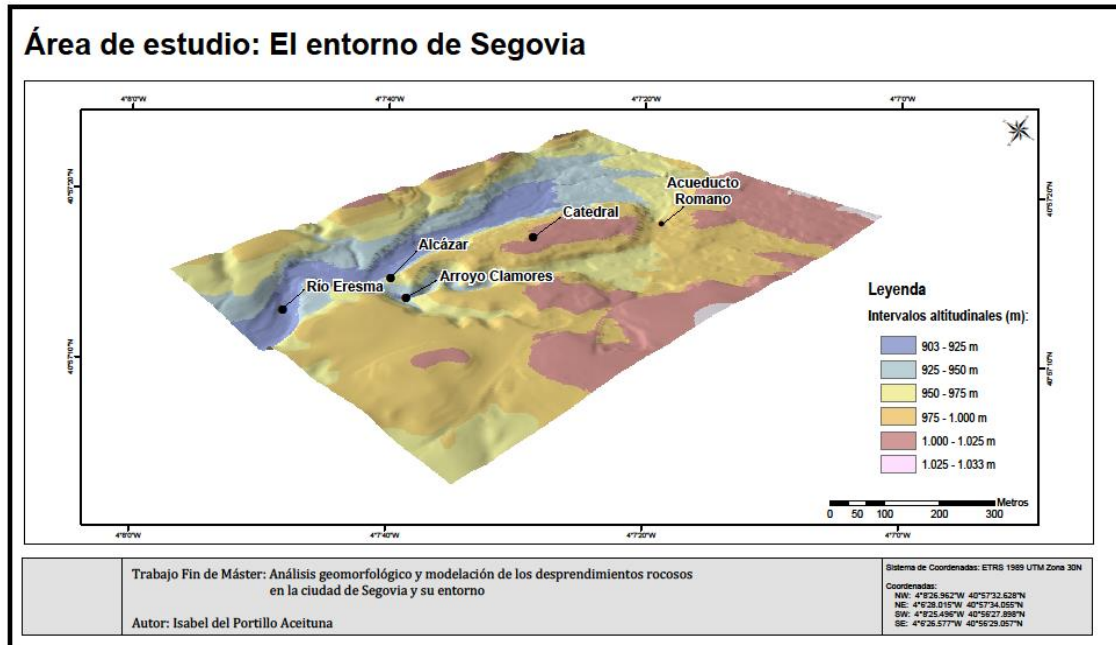


Figura 2. Vista tridimensional sobre el Modelo Digital de Elevaciones que muestra la altitud en el entorno de Segovia. Fuente: Elaboración propia. MDE obtenido del Instituto Geográfico Nacional

En esta estrecha franja, el río Eresma y los arroyos Clamores y Cigüñuela se han encajado transversalmente, excavando cortos valles, a modo de cañones de paredes verticales o escarpadas y fondos planos (Sanz Herráiz, 1988; Díez-Herrero y Martín-Duque, 2005; Tanarro et al., 2010), poniendo al descubierto en sus laderas y cortados los contactos entre rocas e infinidad de afloramientos de los diferentes conjuntos rocosos y sus estructuras (Díez-Herrero y Martín-Duque, 2005). Así pues, el espacio interfluvial entre estos valles ha quedado configurado, desde el punto de vista geomorfológico, a modo de un cerro aislado, que ha condicionado el emplazamiento y poblamiento de la ciudad histórica de Segovia (Díez-Herrero y Martín-Duque, 2005). Tal como indica Martínez de Pisón (1976) al referirse a su centro histórico [...situado sobre el espolón rocoso encajado entre los valles del río Eresma y el arroyo Clamores, ofreciendo una gran singularidad geográfica formalizada en sus extremos por el Acueducto y el Alcázar, siendo las claves de su organización interna la muralla y el gran espacio ocupado por la Catedral y la Plaza Mayor...].

Sin duda, las escarpadas paredes de estos pequeños cañones constituyen un peligro natural al ser el área fuente de la ocurrencia no sólo desprendimientos de rocas, sino también de otros movimientos de ladera, convirtiéndose en un riesgo que amenaza a los diferentes bienes expuestos; como por ejemplo: a los habitantes que transitan por los senderos o caminos o carreteras del entorno de la ciudad, al patrimonio histórico-artístico, etc. (Figura 3).

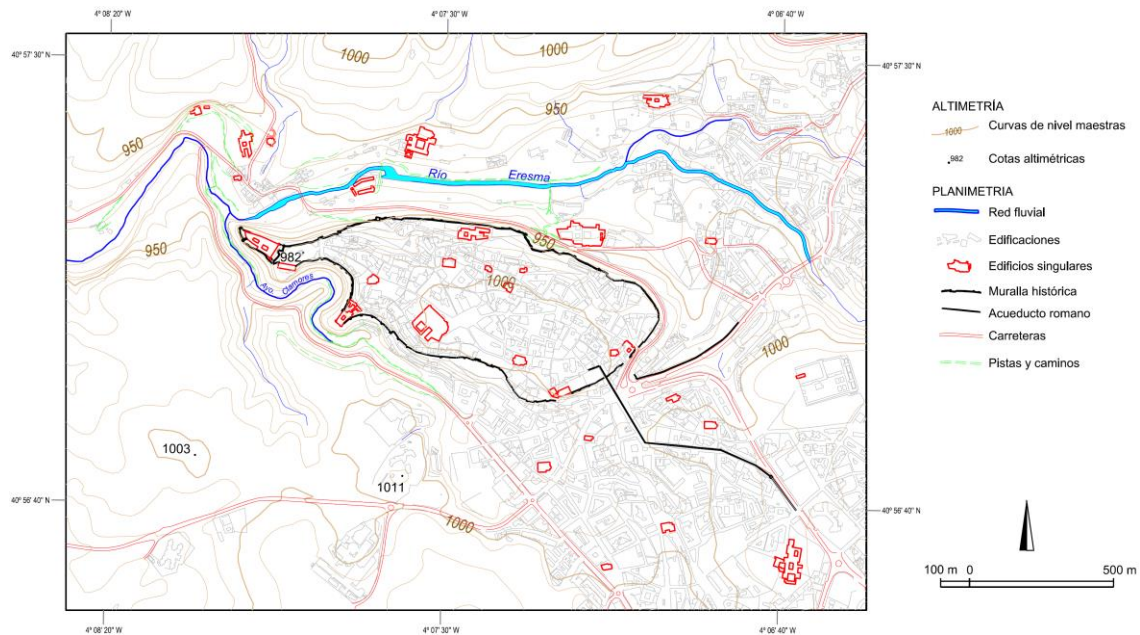


Figura 3. Mapa base o topográfico en el que se incluyen elementos expuestos: edificios relevantes, sendas y caminos en el entorno de Segovia.

1.2. Estudios previos sobre los desprendimientos y otros fenómenos de ladera en el entorno de Segovia

Este tipo de peligros naturales y el riesgo potencial que conllevan han sido estudiados en el entorno de la ciudad de Segovia desde hace ya varias décadas. Así, en el año 1993, Díez-Herrero y Martín-Duque analizan los fenómenos gravitacionales en el entorno de la ciudad de Segovia, realizando un análisis de riesgos con vistas a la ordenación territorial, y elaborando una cartografía de la zonificación del grado del riesgo asociado a los fenómenos gravitacionales. Esta cartografía ha sido validada recientemente mediante el estudio de eventos recientes, que han ocurrido con posterioridad a la elaboración de los mapas, confirmando que el 74% de los movimientos ocurridos, se localizan en las zonas delimitadas como de mayor susceptibilidad (Díez-Herrero et al., 2012).



La cartografía de peligrosidad y riesgos naturales elaborada en los citados trabajos se ha utilizado en la tramitación de las Directrices de Ordenación de Ámbito Subregional de Segovia y su Entorno (DOTSE), y en el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) a partir del informe de la Agencia de Protección Civil de Castilla y León relativo al DALS (Documento de Adaptación para el Levantamiento de la Suspensión Parcial del PG08) que deja constancia de que Segovia tiene un riesgo medio de inundación conforme al Plan de Inundación de Castilla y León a los efectos de riesgo poblacional. Debido a estas circunstancias, la Agencia de Protección Civil requiere que en el expediente del DALS se incluya un análisis y diagnóstico de todos los riesgos naturales y tecnológicos que puedan acaecer en la ciudad. Para ello, se han tomado referencias de los trabajos citados en materia de riesgos geomorfológicos, entre los que se incluyen los desprendimientos.

Asimismo, el estudio científico, concienciación y divulgación de los riesgos en el entorno de Segovia se manifiesta con la celebración anual de la excursión científico-didáctica “A Todo Riesgo”, que en el pasado mes de noviembre de 2016 ha cumplido 10 años (Díez-Herrero et al., 2016). A lo largo de este período, y en lo que concierne a los desprendimientos propiamente dichos, se ha llevado un registro y un pormenorizado análisis de los desprendimientos ocurridos en fechas históricas, a través de fuentes documentales, como por medio de trabajo de campo. En total se han inventariado 23 desprendimientos y caídas de rocas, afectando, con excepción de uno, a rocas carbonáticas. Cabe destacar, además, que 17 de los desprendimientos han ocurrido desde 2003 hasta la actualidad, generando diversas afecciones sobre edificios o sobre vías de comunicación (Díez-Herrero et al., 2016).



Figura 4. Portada de la excursión científico-didáctica “A Todo Riesgo” que ilustra sobre el desprendimiento ocurrido el 26 de diciembre de 2013 en el paseo de Clamores (Diez-Herrero et al., 2014).

1.3. Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) es llevar a cabo un estudio sobre el fenómeno de los desprendimientos de rocas que ocurren en las laderas escarpadas de los cañones entre las que se emplaza la ciudad histórica de Segovia. El estudio se divide fundamentalmente en dos partes. En la primera, se realiza un inventario que recoge la localización del origen de cada desprendimiento y un análisis de los factores condicionantes y desencadenantes de los desprendimientos. Entre los primeros destaca el papel de la litología, la pendiente y la orientación, y, entre los segundos, la influencia de las precipitaciones, temperaturas, etc. Por su parte, en la segunda parte, se lleva a cabo, a partir del tratamiento de esta información, la modelización o simulación preeliminar de la trayectoria y alcance de los desprendimientos, cuyo resultado es un mapa de susceptibilidad al alcance de los bloques o rocas.

En este estudio se han empleado diferentes herramientas y aplicaciones de las Tecnologías de la Información Geográfica, especialmente se ha utilizado un Sistema de Información Geográfica (ESRI ArcGIS) y un programa de cartografía asistida por ordenador -CAD- (Bentley MicroStation). La modelización, en cambio, se ha realizado con el programa RockyFor3D, programa de simulación de desprendimientos, desarrollado por Luuk Dorren (ecorisQ, *International Association of professionals*



working on natural hazard risk management, <http://www.ecorisq.org/>), que calcula las trayectorias de los bloques desprendidos de un escarpe en tres dimensiones. Finalmente, también se ha utilizado el programa Adobe Illustrator y Corel Draw para el diseño o salida gráfica final de alguna figura o gráfico.

La consecución de estos objetivos generales ha permitido desarrollar, a su vez, una serie de objetivos concretos, que básicamente se centran en la relación y explotación estadística entre las diversas variables morfotopográficas y geológicas utilizadas.

- Crear una base de datos con información asociada para cada uno de los desprendimientos localizados, que incluya información sobre la fecha relativa de cada desprendimiento, pendiente, orientación, litología, sentido del buzamiento, etc.
- Análisis estadístico que permita mostrar el papel de cada factor en la ocurrencia de los desprendimientos.
- Mostrar la importancia de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) para detectar las áreas susceptibles a los desprendimientos. Para ello, se han utilizado tres MDE con diferente origen y resolución.
- Mostrar las áreas y los bienes más expuestos a este fenómeno natural, y contrastarlas con los estudios previos.

Finalmente, otro objetivo, de carácter más técnico, al que se ha prestado especial atención, ha sido al proceso de diseño y simbolización de la cartografía temática. Así, para la representación del mapa geológico y del mapa geomorfológico se han diseñado, con el CAD Bentley MicroStation, estilos de líneas personalizadas y tramas específicas siguiendo los estándares y normas de fuentes oficiales.

Capítulo II: Los riesgos asociados a los desprendimientos de rocas. Consideraciones generales



La dinámica de vertientes incluye una diversidad de procesos geomorfológicos entre los cuales se encuentran los desprendimientos o vuelcos de rocas (González et al., 2002). Los desprendimientos propiamente dichos se definen como caídas libres y rápidas de grandes fragmentos de roca en forma de bloques aislados a partir de laderas muy escarpadas (Corominas, 1989; Flageollet y Weber, 1997) o como movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos (Alcántara, 2000) que suelen provocar importantes daños por la velocidad del movimiento. Por su parte, en los vuelcos, tipo particular de desprendimiento, la caída consiste en un movimiento de rotación hacia delante o hacia el exterior (*toppling*), actuando la base del bloque como de eje pivotante sobre el que se produce la rotación y la consiguiente caída o desplome (Dikau et al., 1997).

Este tipo de movimiento de ladera ocurre en las denominadas vertientes de gravedad activa (Muñoz, 1992), que constan de tres partes: el escarpe o cornisa ocupa la parte superior de la vertiente; se desarrolla sobre la roca in situ, donde la pendiente es superior a 45° , y es el ámbito en que la meteorización produce el material. El talud se localiza por debajo del escarpe, y presenta una inclinación entre los 30 y 40° . Finalmente, el enlace basal es una pendiente de modesta inclinación –del orden de 10° – y forma suavemente cóncava que enlaza el talud con el pie de la vertiente. Las propiedades físico-químicas principalmente de los escarpes y de los taludes condicionan la probabilidad de caídas y desprendimientos de rocas (Figura 5).

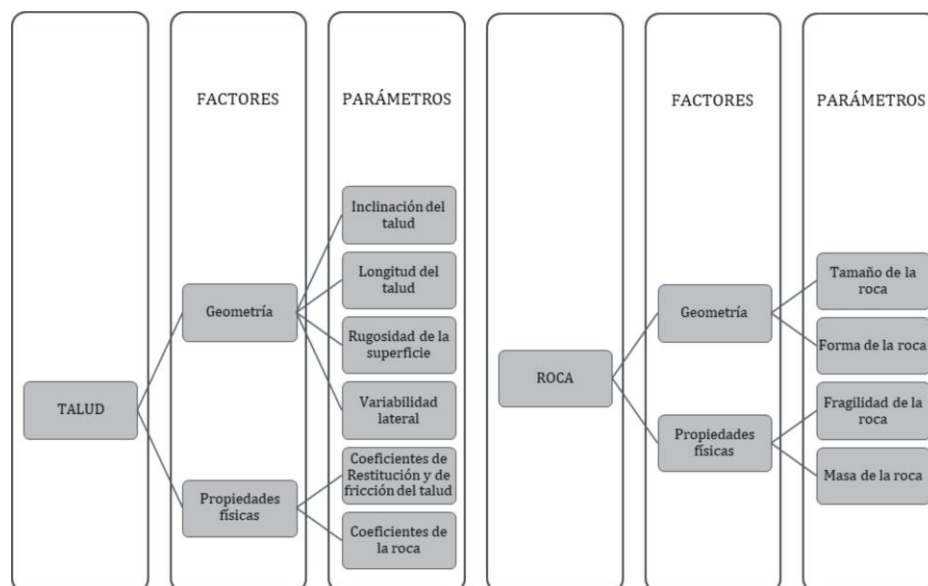


Figura 5. Resumen de algunos parámetros que condicionan los desprendimientos. Elaboración propia a partir de Jones, 2000.

En los escarpes las características litoestratigráficas y tectónicas de las rocas que determinan diferentes planos de ruptura (planos de estratificación, grietas, fracturas, buzamientos, etc.), junto con factores topográficos, como son las elevadas pendientes y la orientación, constituyen los factores que favorecen en mayor medida la ocurrencia de desprendimientos (Ferrer, 1988; Coe et al., 2005). Asimismo, el desplazamiento y las trayectorias que siguen los bloques ladera abajo están determinadas por el propio perfil topográfico de la ladera (Ferrer, 1988; Tanarro y Muñoz, 2012) (Figura 6), así como por parámetros como la rugosidad de la superficie, las propiedades físicas del suelo o formación superficial.



Figura 6. Ejemplo de las trayectorias de bloques según la tipología de las laderas. Fuente: Ferrer, 1988, Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas.

Por otro lado, en el desencadenamiento final de un desprendimiento intervienen diversos factores, entre los que destacan factores meteorológicos (precipitaciones intensas, acción de las heladas), geofísicos (terremotos), hidrológicos (erosión lateral de los ríos), y antrópicos (ocupación del suelo).

Finalmente, en el análisis de los desprendimiento de rocas y en el riesgo que este fenómeno natural puede conllevar interesa, especialmente, conocer el alcance máximo de los bloques que se desprenden, pues permitirá detectar aquellos usos del territorio más expuestos (Ayala-Carcedo et al., 2003, Coe et al., 2005). La determinación de las trayectorias y del alcance máximo posibilitara obtener un primer mapa de la susceptibilidad a este tipo de peligro natural, que cómo se ha indicado, es uno de los objetivos principales de este TFM.

Generalmente, al producirse un desprendimiento, en la base del talud suelen quedar los fragmentos de rocas procedentes del escarpe en un ángulo de aproximadamente de unos 32-38°, mientras algunos bloques de mayores dimensiones, debido a su mayor

energía y menor propensión a ser detenidos por obstáculos como los árboles o por la propia rugosidad de la superficie, alcanzan posiciones más alejadas, donde el ángulo de la pendiente se sitúa en torno a 10-20°. No obstante, la base del talud está marcada por un cambio abrupto, en el que el ángulo de la pendiente es inferior a 10°, lo que supone una reducción sustancial del número de fragmentos de bloques que llegan a esta posición. Esta zona se conoce como área de rocas periféricas, donde aparecen bloques periféricos dispersos, suelen presentar un mayor riesgo ya que no sólo se depositan en la base del talud sino que realizan un desplazamiento mayor (Figura 7).

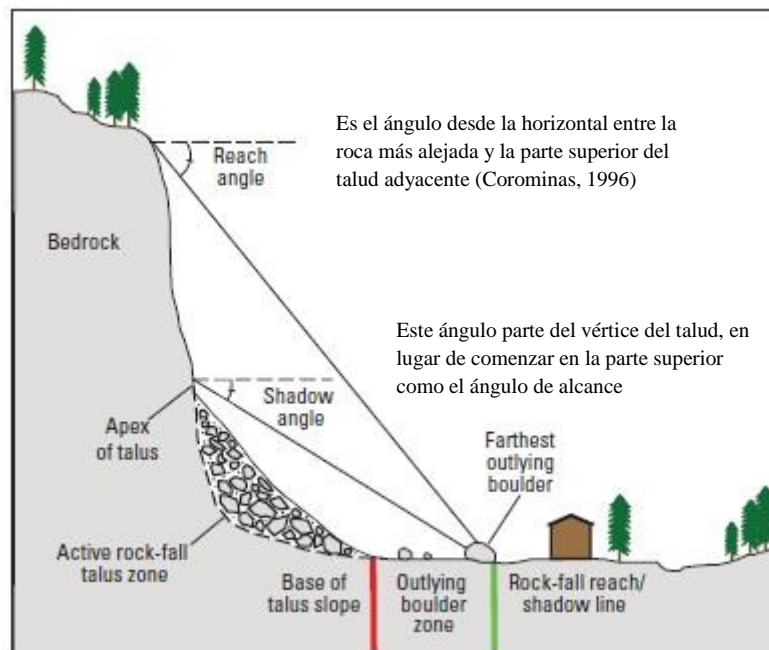


Figura 7. Diagrama que muestra la típica morfología de una vertiente tipo escarpe-talud. La base de la pendiente del talud (línea roja), la zona de rocas periféricas, es decir, aquellos bloques de tamaño sustancial que viajan más allá de los límites del depósito del talud y la roca más lejana -determinando el ángulo (línea verde)-. Modificado de Greg M. Stock, Nicolas Luco, Brian D. Collins, Edwin L. Harp, Paola Reichenbach, and Kurt L. Frankel (2014).

Capítulo III: Materiales y metodología



3.1. Fuentes y materiales de partida

El desarrollo de la investigación de los desprendimientos ha requerido obtener información sobre la topografía, geología y geomorfología, así como imágenes (fotografías aéreas y ortofotos). También se han obtenido variables meteorológicas (series de precipitaciones y temperaturas diarias) con el fin de relacionar algún desprendimiento reciente con posibles causas climáticas. A continuación, se muestra la recopilación de los materiales de partida y sus principales características:

INFORMACIÓN	ESCALA / PASO DE MALLA	SISTEMA DE COORDENADAS	FUENTE
Cartografía básica o topográfica			
Mapa topográfico	1:25.000	ETRS 1989 UTM Zone 30N	http://www.ign.es/web/ign/portal
Mapa topográfico	1:5.000	ETRS 1989 UTM Zone 30N	http://www.cartografia.jcyl.es/
Modelo Digital de Elevaciones			
MDT25	25×25 m	ETRS 1989 UTM Zone 30N	http://www.ign.es/web/ign/portal
MDT05 - LiDAR	5×5 m	ETRS 1989 UTM Zone 30N	http://www.ign.es/web/ign/portal
Vuelo fotogramétrico LiDAR			
Vuelo fotogramétrico LiDAR	2×2 m	ETRS 1989 UTM Zone 30N	http://www.ign.es/web/ign/portal
Cartografía temática			
Mapa geológico	1:50.000	ED50, Lat./Long.	http://info.igme.es/cartografia/magna50.asp?hoja=483
Esquema geomorfológico	1:18.000	X	Díez y Martín Duque, 1993b
Imágenes			
<u>Fotografías aéreas</u>			
Vuelo Americano serie B 1956-57	1:32.000	X	http://www.itacyl.es/opencms_wf/opencms/informacion_al_ciudadano/wms/AccesoDatos/
Vuelo interministerial 1973-86	1:18.000	X	http://www.ign.es/web/ign/portal
Vuelo nacional 1980-86	1:30.000	X	http://www.ign.es/web/ign/portal
Vuelo PNOA 2014	25 cm	X	http://www.ign.es/web/ign/portal
<u>Ortofotos</u>			
PNOA máxima actualidad	1:50.000	ETRS 1989 UTM Zone 30N	http://www.ign.es/web/ign/portal
Variables meteorológicas			
<u>Datos diarios de temperatura y precipitación previos a los desprendimientos</u>			
Temperaturas y precipitaciones diarias (01/10/2004 - 30/04/2005)			INM - AEMET
Temperaturas y precipitaciones diarias (01/10/2010 – 31/03/2011)			INM - AEMET
Temperaturas y precipitaciones diarias (01/10/2013 - 31/03/2014)			INM - AEMET

Tabla 1. Relación de datos de partida y su fuente



El desarrollo metodológico para el análisis de los desprendimientos y para la preparación de la información para la simulación de los desprendimientos ha llevado una serie de etapas.

3.2. La elaboración del inventario de los desprendimientos de roca

La fuente de partida es la relación pormenorizada de los movimientos de ladera ocurridos en tiempos históricos y recientes en el entorno de la ciudad de Segovia, que ha sido llevada a cabo y actualizada año a año en la Excursión “A Todo Riesgo” (Díez-Herrero et al., 2016). En la última memoria, como se ha señalado anteriormente, se han recopilado al menos 23 eventos (entre caídas, desprendimientos y vuelcos) desde los años setenta del pasado siglo hasta 2013, además de la ocurrencia de varios desprendimientos históricos recogidos en fuentes documentales históricas (Díez-Herrero et al., 2016). También ha sido de gran ayuda la consulta de la hemeroteca de la prensa local (El Adelantado de Segovia), pues por regla general todos los eventos son noticia (Figura 8), aunque siempre y cuando tengan consecuencias sociales o económicas.

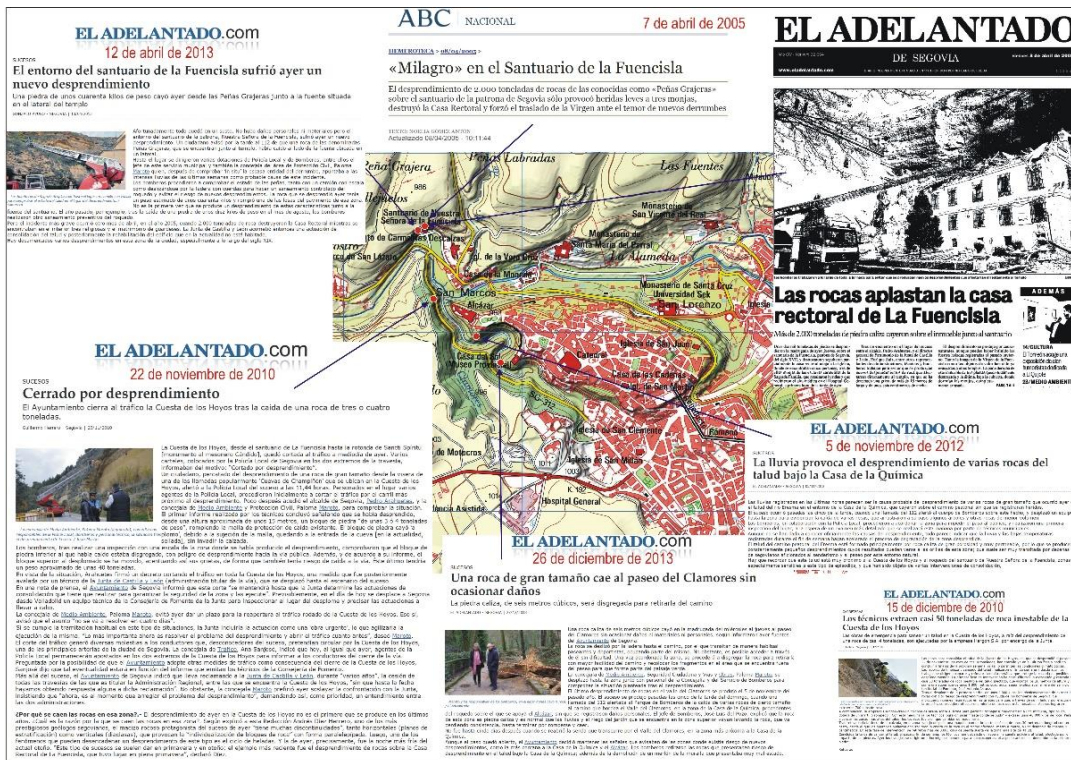


Figura 8. Recopilación de noticias de prensa sobre desprendimientos ocurridos en Segovia, y su localización sobre la base del MTN25 del IGN.

A partir de la relación de eventos, el siguiente paso ha sido localizar el origen de cada evento en un Sistema de Información Geográfica. La presencia de cicatrices en las

paredes o escarpes de los cañones y de bloques en el talud hace posible que a través de ortofotos y con apoyo de campo, se pueda localizar el punto de origen de los desprendimientos, y representarlo de manera cartográfica mediante un “punto”.

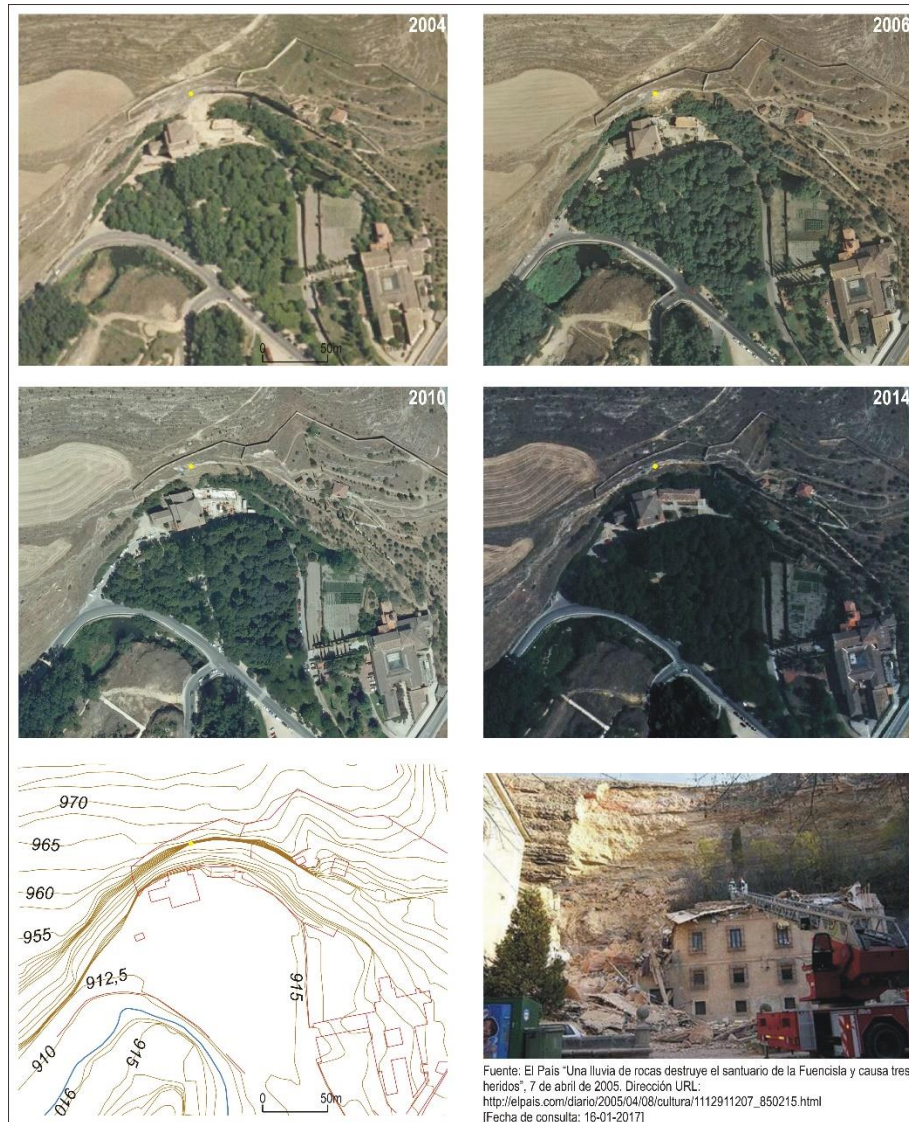


Figura 9. Proceso metodológico para localizar el origen de los desprendimientos con apoyo de ortofotos y topografía. El “punto en color amarillo” indica el origen del desprendimiento.

La composición anterior muestra el análisis de las ortofotos para localizar el origen de los desprendimientos, tomando como ejemplo el desprendimiento ocurrido el 7 de abril de 2005 en la pared externa del meandro donde se emplaza el Santuario de La Fuencisla (Figura 9). Pero además, el inventario se ha intentado completar con trabajo de campo y con la utilización de aplicaciones novedosas como “Google Street View”. En esta aplicación es posible recorrer las carreteras y principales paseos que circundan

el entorno de Segovia y obtener una imagen fotográfica de las paredes o escarpes de los cañones, que ha permitido identificar y localizar algunos desprendimientos (Figura 10).

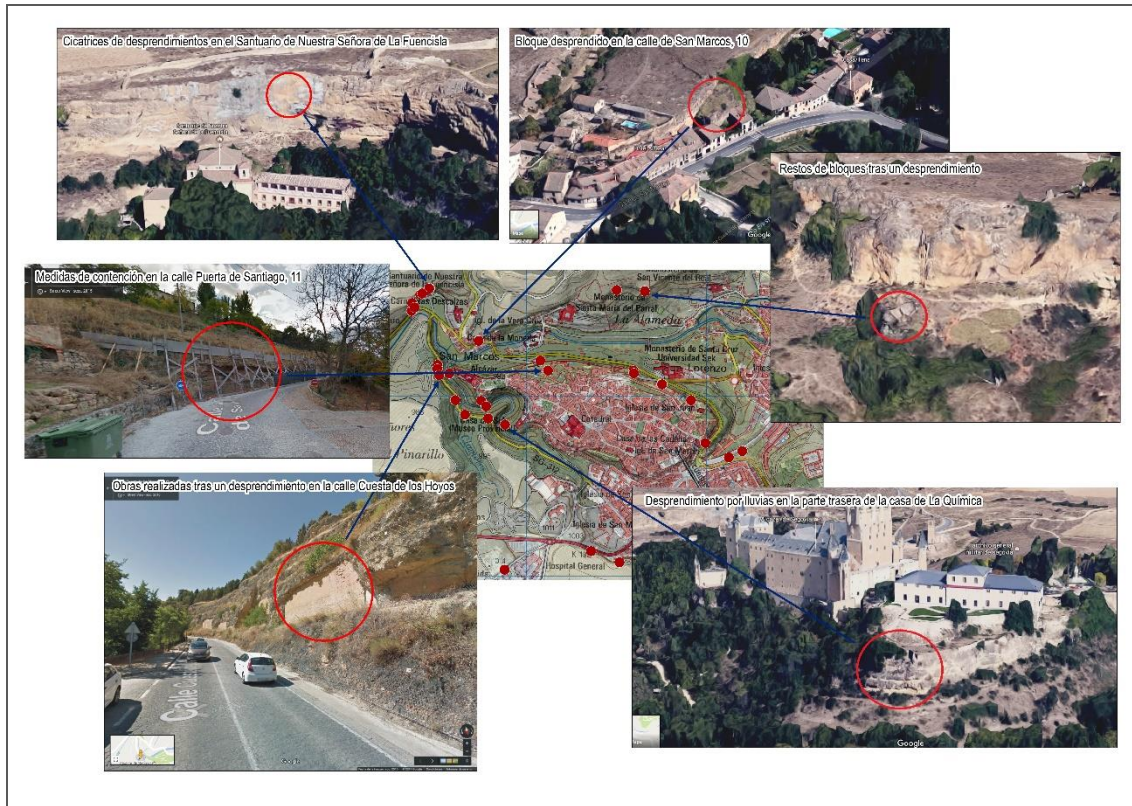


Figura 10. Desprendimientos localizados con la herramienta “Google Street View”.

En este proceso también se ha intentado utilizar fotografías aéreas antiguas con el objeto de detectar la fecha relativa de algún desprendimiento antiguo. Los fotogramas correspondientes al área de estudio se han georreferenciado, utilizando como apoyo ortofotos del PNOA; sin embargo la imposibilidad de disponer de fotogramas digitales a una alta resolución ha dificultado la posibilidad de identificar desprendimientos en las paredes de los cañones. Tan solo se ha detectado la separación de un gran bloque en la margen derecha del río Eresma en San Marcos (Diez-Herrero et al., 2011), si bien la baja calidad del fotograma de 1956 impide saber si ésta se produjo con posterioridad a esta fecha (Figura 11).



Figura 11. Evolución de un gran bloque desprendido por socavación lateral del río Eresma en San Marcos.

3.2.1. Los factores topográficos

La orientación, y sobre todo, la pendiente constituyen las variables topográficas que más influencia tienen en el desencadenamiento del fenómeno de los desprendimientos. Ambas se han obtenido a partir del modelo digital de elevaciones (MDE). Además, como se ha indicado, uno de los objetivos de este TFM es valorar la importancia que tiene la resolución de los MDE en la elaboración de mapas de susceptibilidad basados en la pendiente y en la simulación de los desprendimientos. Por esta razón se han obtenido tres MDEs que proceden de fuentes diferentes.

3.2.1.1. Modelo Digital de Elevación a partir del Mapa Topográfico a escala 1:5.000

El primer MDE parte del mapa topográfico de la Junta de Castilla y León a escala 1:5.000, del cual se ha extraído la altimetría (curvas de nivel y cotas). Ambos archivos se han descargado de la web “Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (<http://www.cartografia.jcyl.es/>)”, en formato “shapefile” (*.shp), y se han procesado en el programa ArcGIS.

El MDE se ha generado a través de las herramientas de Gestión de Datos “Create TIN” (ArcToolbox/Data Management/TIN/Create TIN), obteniéndose la red irregular



de triángulos (TIN), y teniendo la precaución de asignar en “Height Field” el campo de elevación tanto para las curvas de nivel como para las cotas. Posteriormente, a partir de la red irregular de triángulos, se ha procedido a su conversión en formato raster (ArcToolbox/Conversion/From TIN/TIN to Raster), con un lado de celda de 5 metros (Figura 12).

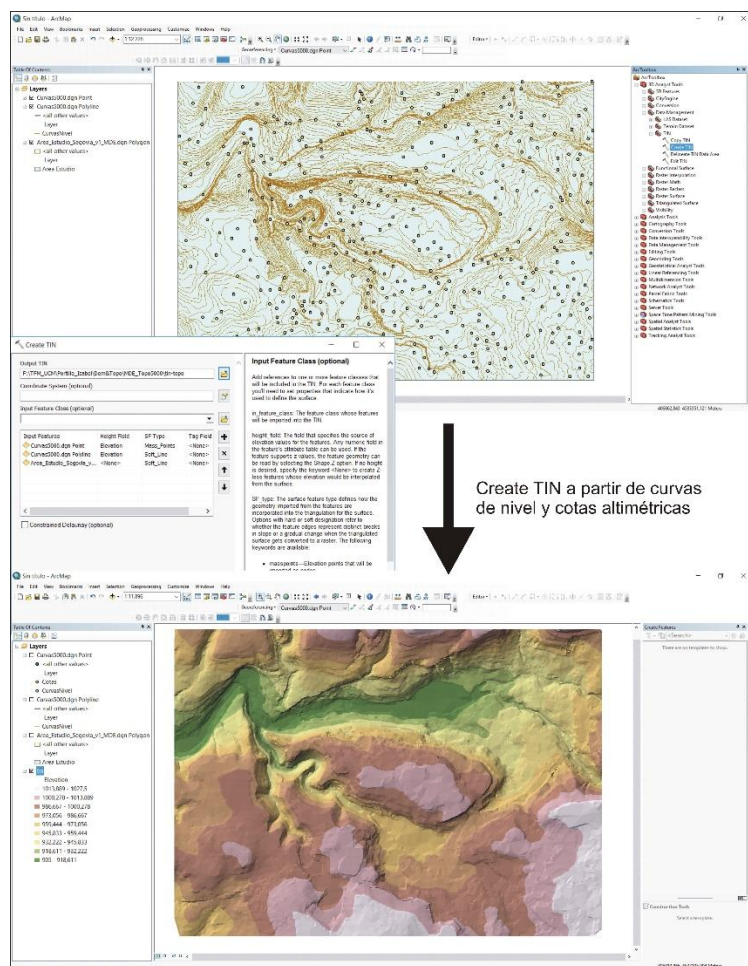


Figura 12. Proceso de elaboración de la red irregular de triángulos a partir de las curvas de nivel y cotas en el programa ArcGIS.

3.2.1.2. Modelo Digital de Elevación a partir del LiDAR 5×5 m

Este MDE ya está formado y disponible en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Instituto Geográfico Nacional. Se trata de un modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m en formato de archivo ASCII matriz ESRI (asc), con la misma distribución de hojas que el mapa topográfico nacional (MTN) a escala 1:50.000. Desde el Centro de Descargas del citado organismo se ha descargado el MDT05-0483-LIDAR, correspondiente a la hoja del MTN de Segovia.



El MDE se ha abierto con ArcGIS y se le ha aplicado un recorte para que se ajustase al límite del área de estudio, en este caso por medio de la herramienta “Extract by Mask” (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Extract by Mask).

3.2.1.3. Modelo Digital de Elevación a partir del vuelo fotogramétrico digital con Vuelo LiDAR

El vuelo fotogramétrico digital con Vuelo LiDAR, dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), llevado a cabo a lo largo del año 2011, se ha generado, tal como se indica en la página del Centro de Descargas del CNIG, como ficheros digitales con información altimétrica de la nube de puntos LiDAR, distribuidos en ficheros de 2x2 km de extensión, y siendo el formato de descarga un archivo LAZ (formato de compresión de ficheros LAS). La densidad de puntos LiDAR es de 0,5 puntos/m².

La elaboración del MDE a partir de estos ficheros es algo más laboriosa y necesita, además, un tratamiento previo. Para cubrir el área de estudio se ha hecho necesario descargar seis ficheros con extensión *LAZ. El primer paso es descomprimir estos ficheros por medio de una aplicación (LasTask Tools) diseñada por el IGN para descomprimir ficheros *LAZ y para visualizar y editar ficheros *LAS. Estos últimos se pueden abrir y tratar en ArcGIS. Una vez abierto el programa se debe crear un “LAS Dataset” y configurar sus propiedades para poder trabajar con ficheros con extensión *LAS. Es necesario añadir los ficheros descomprimidos y establecer el sistema de coordenadas correspondiente. Realizado esto, se calculan las estadísticas para evaluar la cobertura del archivo.

Las estadísticas ofrecen información sobre cada pulso laser que contiene un archivo *LAS. Algunos de sus atributos son el número de retornos y la cantidad de retornos (reflectividad de la fuerza de retorno del objeto alcanzado por el pulso láser), la clasificación que cada punto puede tener (se asigna por el tipo de objeto que lo reflejó) y la distancia entre puntos, permite obtener la densidad de un fichero y sirve para decidir la resolución o tamaño de la celda del raster.

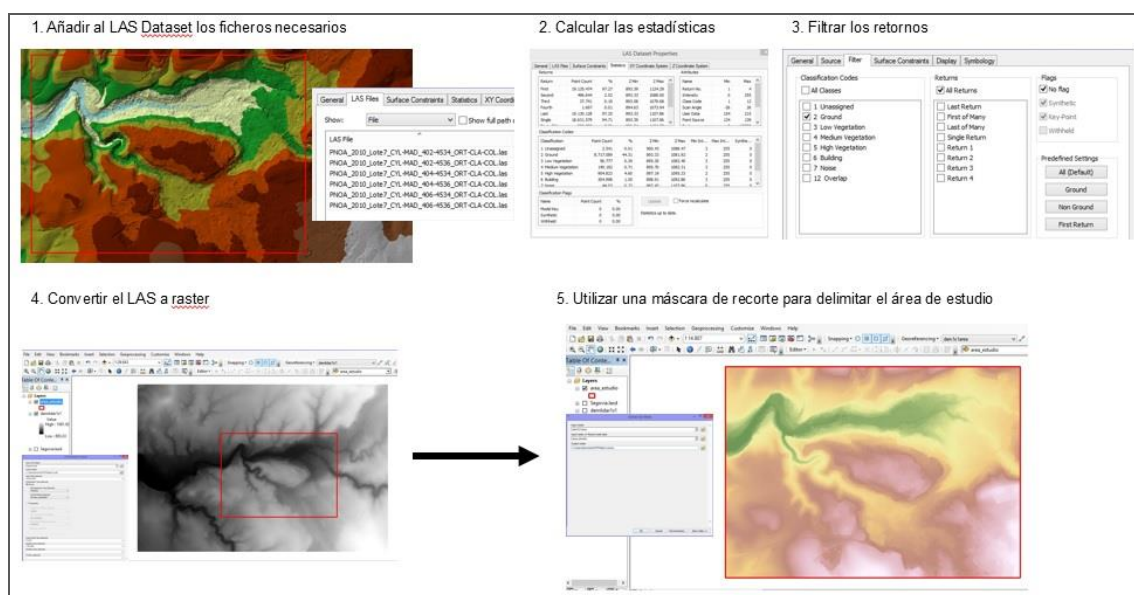


Figura 13. Pasos realizados para la obtención de un DEM a partir del vuelo fotogramétrico digital con Vuelo LiDAR.

Una vez calculadas las estadísticas, se puede visualizar la nube de puntos en el programa. El módulo “LAS Dataset” permite realizar perfiles y vistas en 3D de la nube, así como aplicar filtros (todos los retornos, el suelo, etc.). Desde las propiedades del archivo se filtraron los retornos que están clasificados como construcción y vegetación con la finalidad de obtener sólo la información del “suelo desnudo”. El siguiente paso, fue convertir el LAS Dataset a raster, para generar el MDE, con una resolución de 1 metro. Para llevarlo a cabo, se empleó la herramienta “LAS Dataset to raster” donde se introdujo el archivo *.LAS y se seleccionó el campo “ELEVATION”. Además, para realizar la interpolación se utilizó la media y la aproximación al vecino cercano evitando así el método de triangulación. En esta herramienta es importante indicar la resolución del raster.

Finalmente, se obtiene un DEM con la extensión de los seis ficheros introducidos al principio. En este caso la superficie del área de estudio es menor y mediante la herramienta “Extract by mask” se ha hecho un recorte con el polígono que delimita el área de estudio para conseguir el territorio requerido.

Por último, a partir de los tres MDEs (Figura 14) realizados desde fuentes diversas se obtuvieron los respectivos modelos digitales de pendientes y orientaciones mediante herramientas de análisis espacial “Aspect” y “Slope” (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Surface).

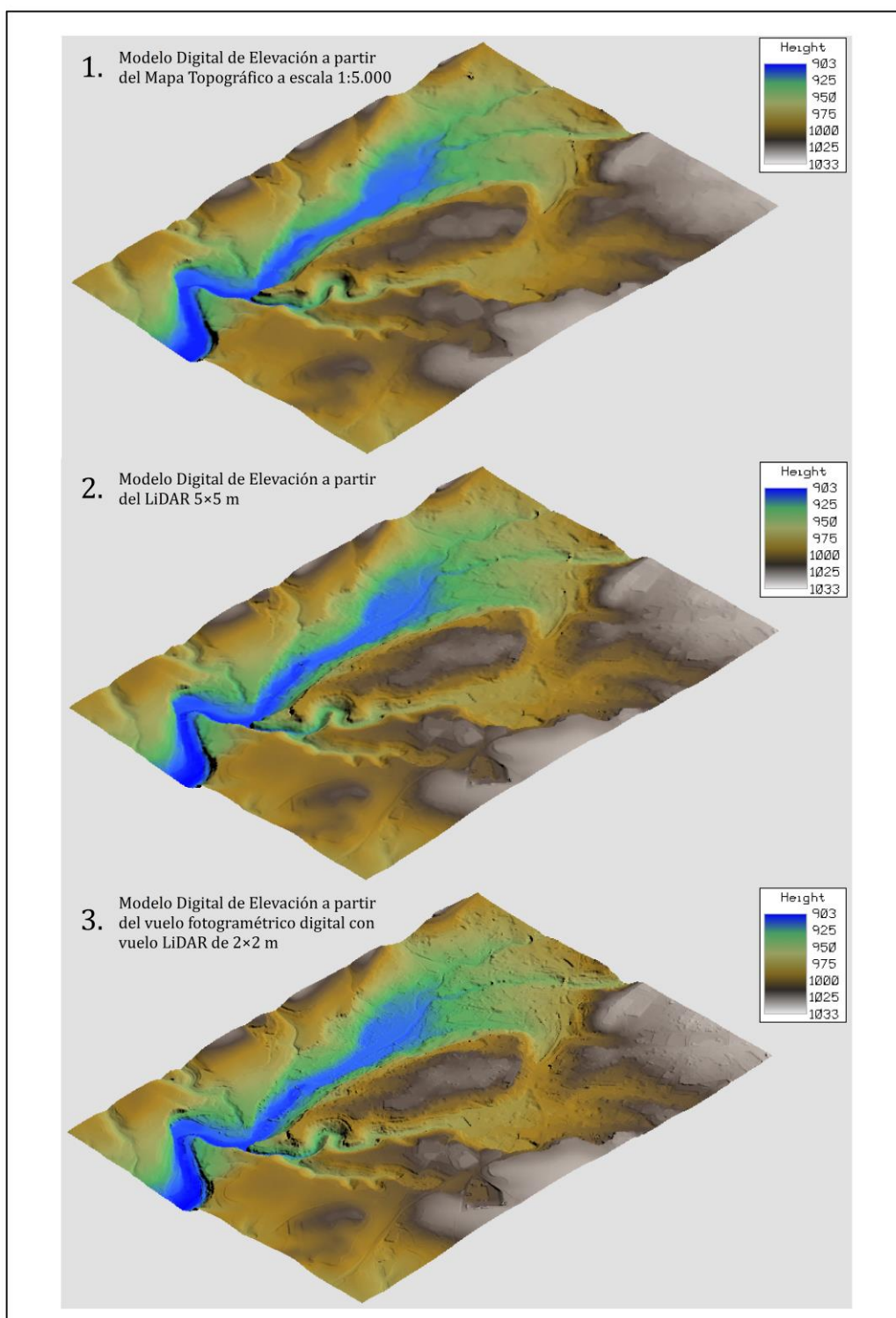


Figura 14. Comparación visual de los Modelos Digitales de Elevación procesados en el software MicroStation.

La pendiente constituye una de las variables más importantes que favorecen el desencadenamiento de desprendimientos, de manera que se han creado tres mapas de

pendientes (uno por cada MDE) (Figura 15), cuyo tratamiento posterior ha permitido elegir el umbral crítico en el que ocurren los desprendimientos.

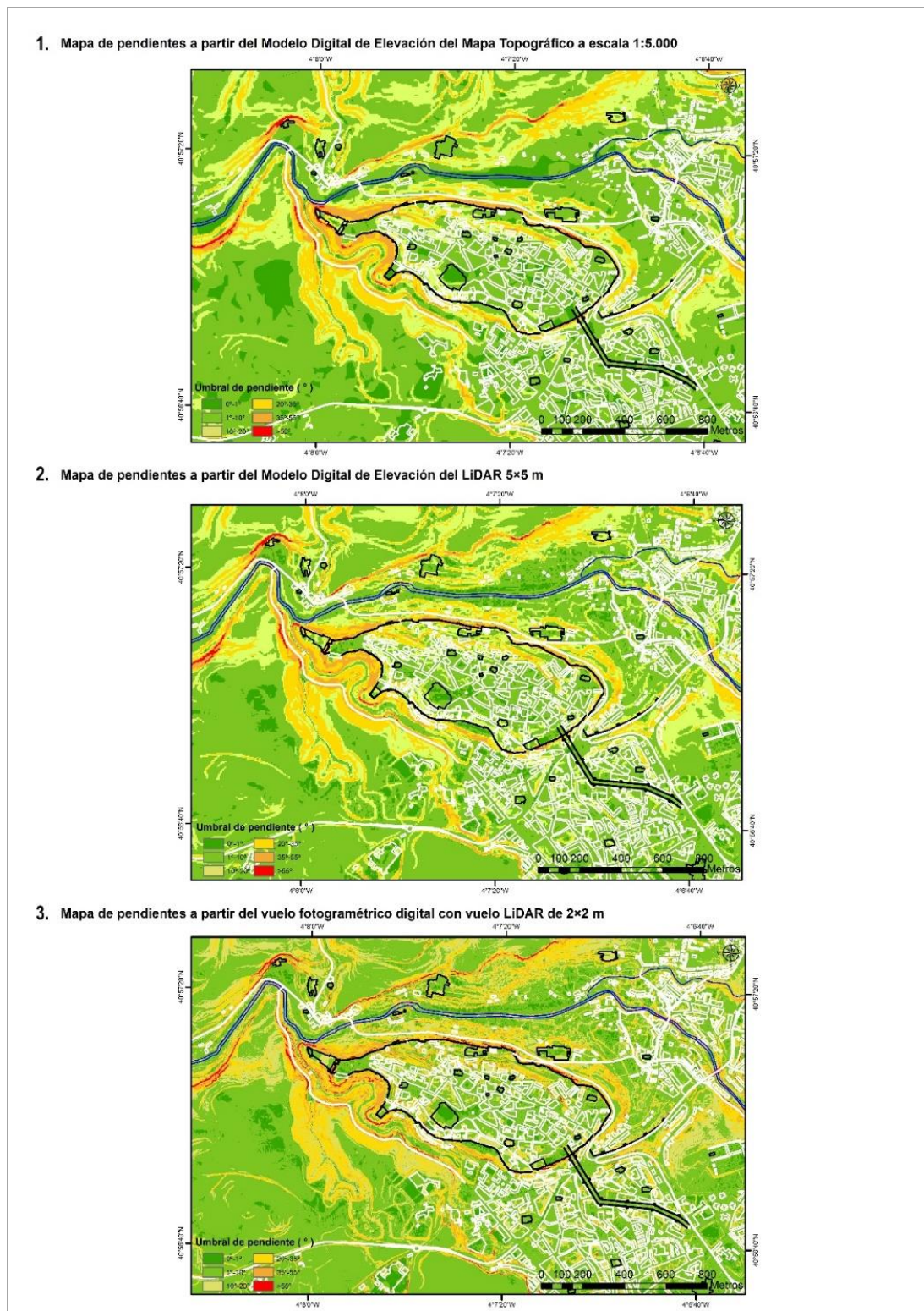


Figura 15. Comparación de los mapas de pendientes obtenidos a partir de los diferentes Modelos Digitales de Elevación

3.2.2. Los factores litológicos y geomorfológicos

3.2.2.1. La litología

Las características litológicas del entorno de la ciudad de Segovia se han obtenido del Mapa Geológico Nacional (MAGNA) a escala 1:50.000 (2ª Serie), realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Desde el servidor de cartografía del IGME se ha descargado la Hoja 0483 (Segovia), tanto el mapa editado escaneado (imagen en formato *.jpg) como el mapa recortado georreferenciado (imagen georreferenciada en coordenadas geográficas y Datum ED 1950).

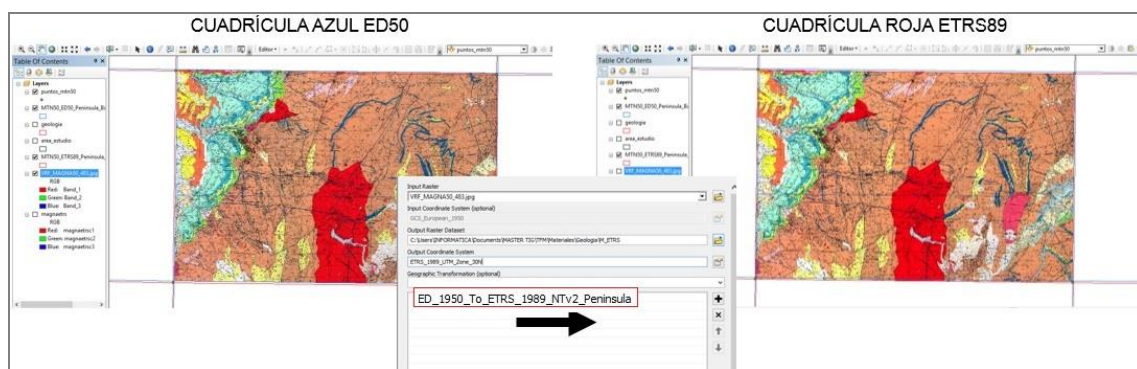


Figura 16. Proceso de transformación del sistema geodésico

Teniendo en cuenta la legislación vigente (Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio) por la que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España, se establece el Datum ETRS89 y proyección UTM -28/31N-, sustituyendo al antiguo Datum ED 1950 con el fin de obtener una cartografía homogénea.

De esta forma, el primer paso fue cambiar el sistema de referencia de la Hoja 0483 de ED50 a ETRS89, para ello se ha utilizado el programa ArcGIS a través de las herramienta “Projections” (Figura 16). Esta herramienta permite seleccionar la rejilla de transformación oficial para la transformación de datum entre ED50 y ETRS89 en España (NTV2 Península). Por tanto, se ha reproyectado al huso 30 y se ha cambiado de Datum a ETRS89. También se ha realizado un recorte con el polígono del área de estudio.

Terminado el proceso, el siguiente paso fue llevar a cabo la digitalización de las unidades geológicas y accidentes tectónicos del área de estudio. Una vez creado un nuevo archivo “shapefile”, se empleó el módulo “Editor” para usar herramientas como

“Trace” que al captar el borde de un polígono inicial permite crear áreas continuas. Es importante para evitar huecos, superposiciones y micropolígonos. De todas formas, se creó una “Personal Geodatabase” para incluir en ella una nueva topología y ver los posibles errores introduciendo la tolerancia y las reglas oportunas para solventar los problemas anteriormente descritos. Posteriormente, se completó la tabla de atributos con la introducción del identificador y descripción de cada unidad geológica.

Posteriormente, el archivo (en formato *.shp) se abrió en el software MicroStation para proceder a la simbolización del mapa. Para esto, se crearon células (Figura 17) y estilos de línea personalizados, además se definieron colores personalizados en la paleta de color para rellenar las unidades geológicas. El diseño se fundamentó en la librería de símbolos del MAGNA (Orozco et al., 2013), así como en “Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization”, preparado por el Servicio Geológico de Estados Unidos para el Comité Federal de Datos Geográficos (FGDC, 2006).

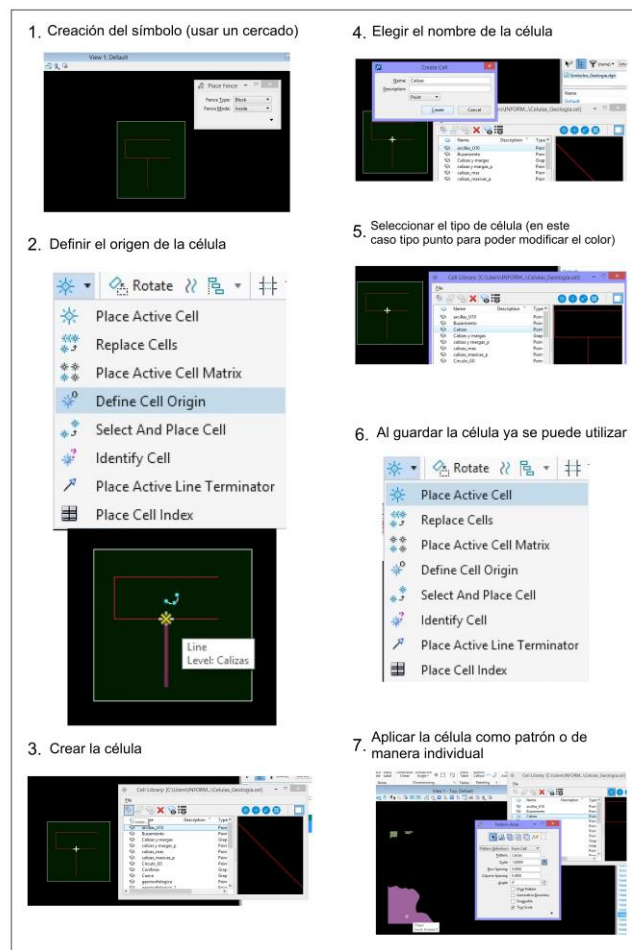


Figura 17. Proceso de elaboración de una célula para aplicarla como patrón.



Finalmente, el mapa geológico (en formato vectorial), que contiene información sobre las diferentes unidades geológicas (litología, edades, accidentes tectónicos, etc.), se ha cruzado con el mapa inventario de los desprendimientos para saber sobre que materiales se producen con mayor frecuencia los desprendimientos a través de la herramienta “Extract Values to Points”.

3.2.2.2. La geomorfología

Los rasgos geomorfológicos del entorno de la ciudad de Segovia se han caracterizado en varios trabajos conducidos por Díez-Herrero y Martín-Duque (1993, 2005). En el primero de estos trabajos, se incluye un esquema geomorfológico que se ha utilizado en este TFM como base para obtener el mapa geomorfológico en formato digital.

El primer paso ha consistido en escanear con alta resolución el esquema geomorfológico, para posteriormente georreferenciarlo, usando el modulo “georeferencing” de ArcGIS. Para ello se han identificado puntos comunes entre el esquema y el mapa topográfico a escala 1:25.000. Se pudieron identificar 65 puntos de control y se aplicó una función polinómica de tercer orden. El error medio cuadrático ha sido de 16,69 m (Figura 18). Posteriormente, en el segundo paso, se ha llevado a cabo la digitalización de las unidades, teniendo como apoyo la cartografía topográfica.

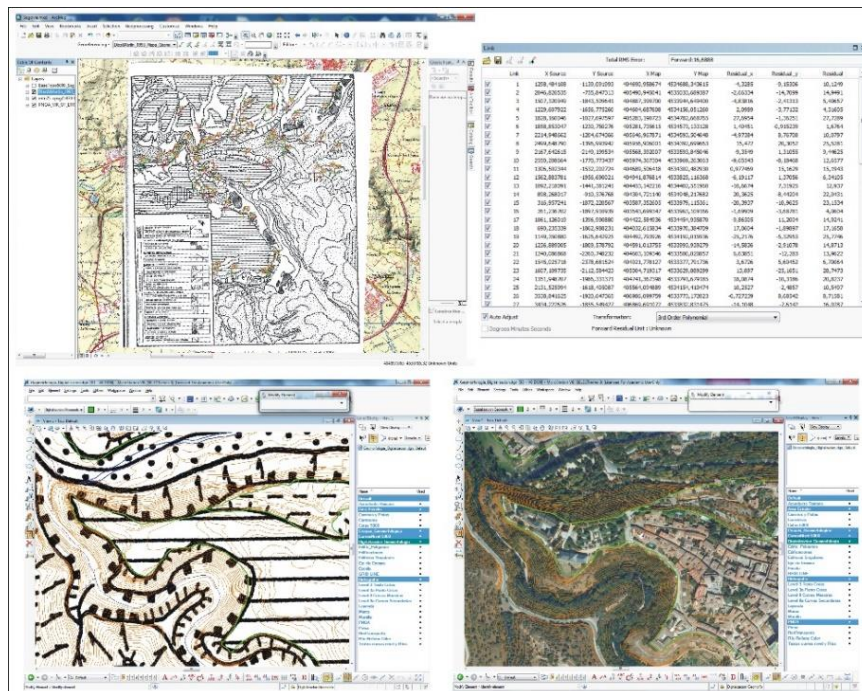


Figura 18. Proceso de georreferenciación del esquema geomorfológico



A diferencia del mapa geológico, en este caso la digitalización de las unidades y elementos geomorfológicos se realizó con el CAD MicroStation, pues ofrece una mayor variedad de herramientas de manipulación y modificación de las diferentes geometrías digitalizadas, y además se tuvieron en cuenta las recomendaciones y las especificaciones para la digitalización de la cartografía MAGNA 1:50.000 (IGME, 2007, Pérez-Cerdán et al., 2012), realizadas con el citado CAD. De igual modo, en este entorno CAD, y en este caso con el programa Bentley MAP, se depuró y creó la topología (Figura 19A). En primer lugar se limpiaron todas las inconsistencias y errores en el proceso de digitalización, incluyendo las tareas de segmentación de líneas y la búsqueda de huecos u líneas colgantes, líneas duplicadas, etc. (Figura 19B); y en segundo lugar, se crearon los polígono de cada unidad, mediante la creación de los centroides (Figura 19C), y a partir de ellos crear las áreas.

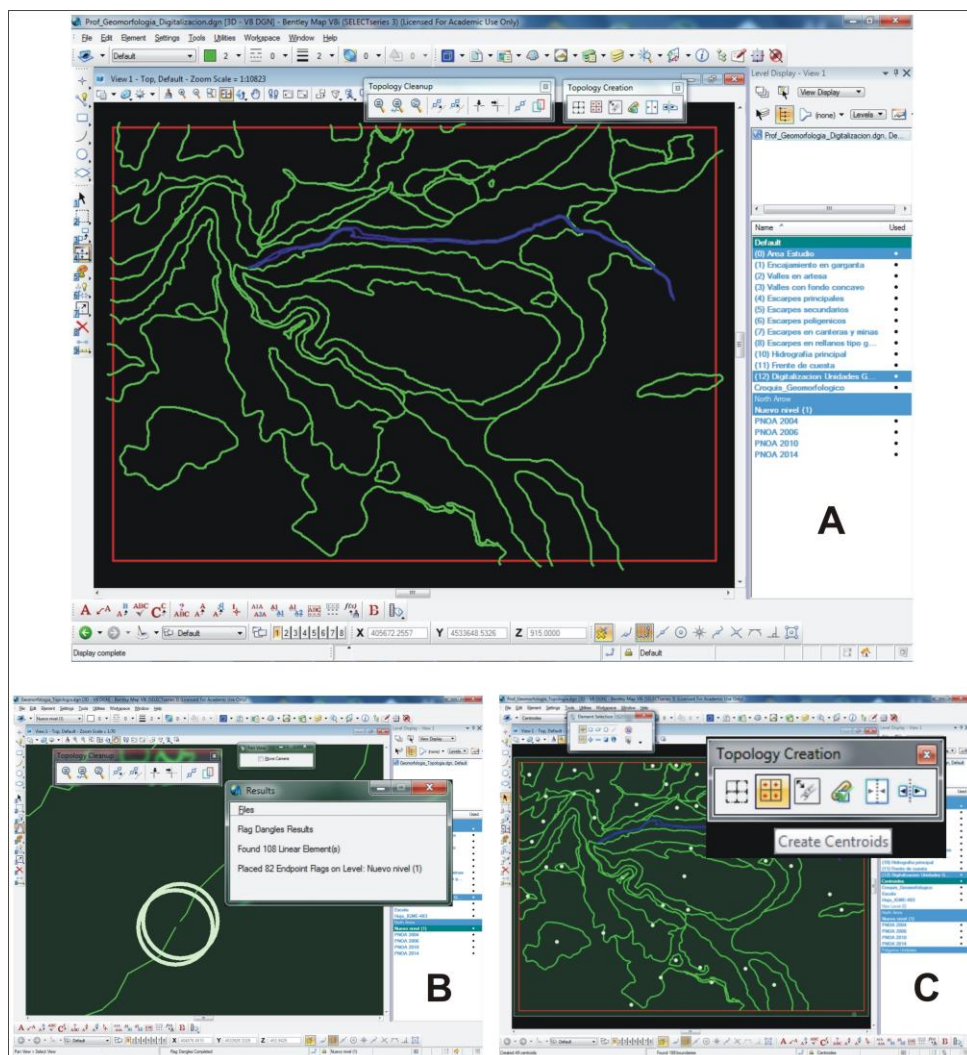


Figura 19. Limpieza y creación de la topología aplicada al mapa geomorfológico.



Finalmente se procedió a la simbolización. En esta última etapa se diseñó el mapa geomorfológico teniendo en cuenta las normas para la confección de “Leyendas para mapas geomorfológicos a escalas 1:25.000/1:50.000 (Peña et al., 1997). De igual modo se crearon estilos de líneas personalizados y diferentes células que después se aplicaron como relleno patrón o trama (Figura 20 A y B)

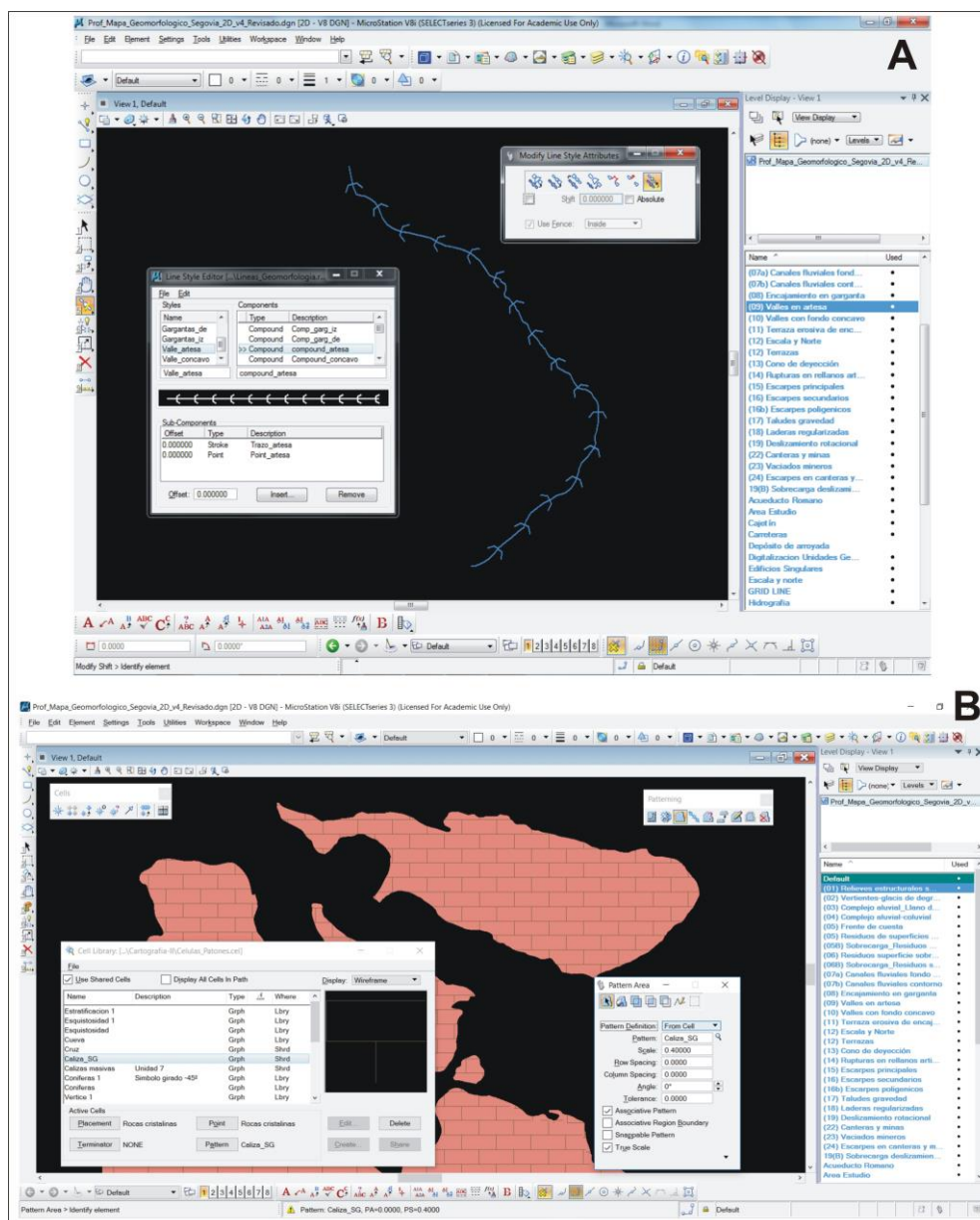


Figura 20. Ejemplo de estilo de línea personalizado y célula aplicada como trama.

El mapa geomorfológico permite diferenciar las principales formas del relieve, en especial apreciar las laderas escarpadas de los cañones, donde se producen los



desprendimientos. Asimismo, las unidades geomorfológicas son una de las fuentes de entrada para la simulación de los desprendimientos, como posteriormente se explicará.

3.3. La obtención y tratamiento de los factores desencadenantes de carácter meteorológico.

Aunque se ha hecho alusión a los terremotos y explosiones como factores desencadenantes de desprendimientos en el entorno de la ciudad de Segovia (Díez-Herrero y Martín-Duque, 2005; Díez et al., 2016), en este TFM se analizan brevemente, la características meteorológicas, en relación con la precipitación y las temperaturas, de alguno de los desprendimientos que han ocurrido en fecha reciente, abarcando el periodo previo y posterior a cada uno de los eventos. En los últimos años han ocurrido los siguientes desprendimientos:

- Desprendimiento del 7 de abril de 2005 (Santuario de La Fuencisla). Los datos climáticos analizados abarcan el periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2004 al 30 de abril de 2005.
- Desprendimiento del 22 de noviembre de 2010 (Cuesta de los Hoyos). Para este desprendimiento se analizan los datos desde el 1 de octubre de 2010 al 31 de marzo de 2011.
- Desprendimiento del 26 de diciembre de 2013 (Paseo Clamores). Los datos seleccionados comprenden desde el 1 de octubre de 2013 al 31 de marzo de 2014.

3.4. La preparación de los mapas para la simulación de los desprendimientos

La simulación de los desprendimientos con el programa Rockyfor3D (Dorren L.K.A., 2015, (www.ecorisq.org), precisa recoger las propiedades físicas de los ámbitos que intervienen en los procesos de desprendimiento, como son: el área fuente de los desprendimientos (escarpes), el área que puede verse afectada por los bloques desprendidos, generalmente representada por el talud, y finalmente la topografía. La definición de estas propiedades se organiza en tres mapas diferentes vectoriales (Figura 21): el modelo digital de elevaciones, el mapa de escarpes (*release map*), donde se especificarán las propiedades de la roca y el tamaño de los bloques que pueden desprenderse; y, finalmente, el mapa de unidades geomorfológicas (*soil type map*)

donde se especifica, para cada unidad, las propiedades físicas del suelo y la rugosidad de la superficie.

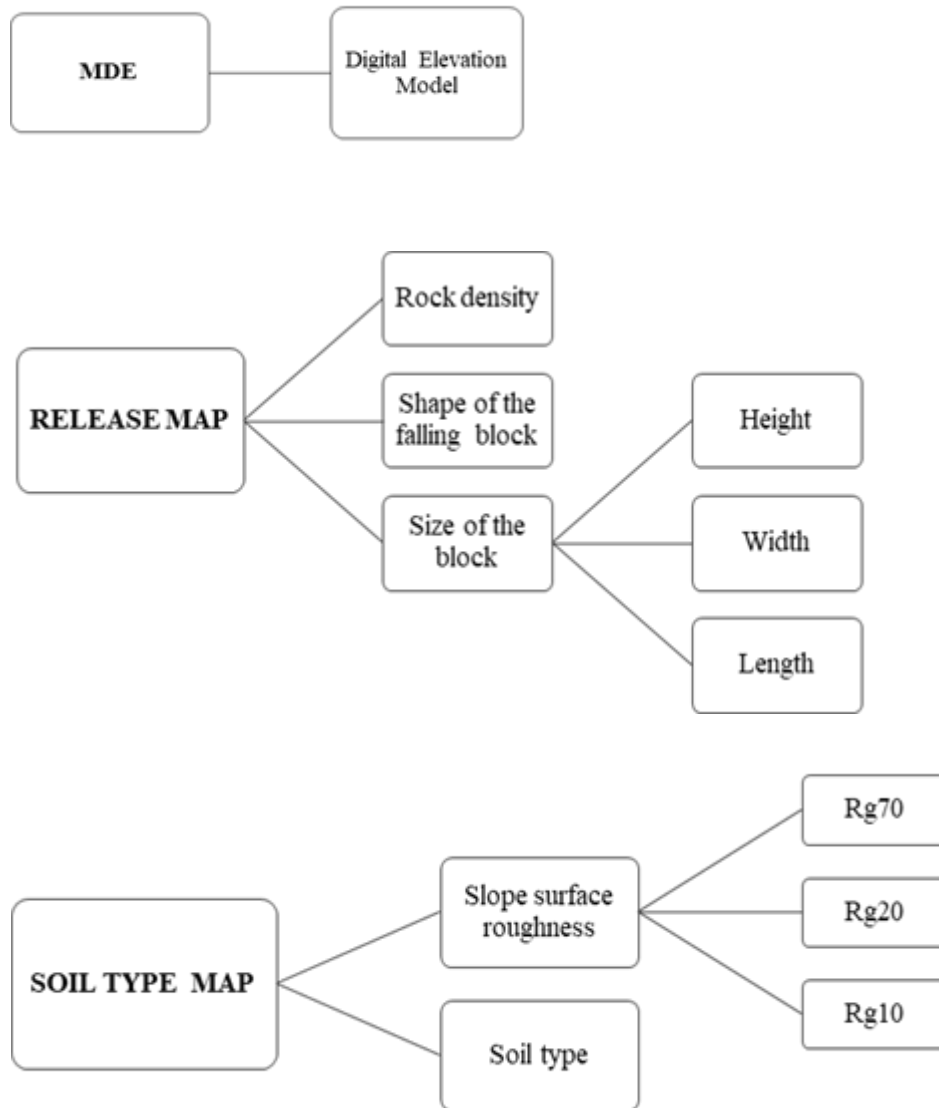


Figura 21. Esquema que muestra los parámetros de entrada para realizar la simulación con el software Rockyfor3D. Elaboración propia a partir del manual del programa.

Para obtener el tamaño de los bloques (height, width y length) que se incluyen en el mapa de escarpes (release map), fue necesario realizar trabajo de campo y tomar medidas de los diferentes bloques desprendidos para calcular su media e introducirla en la tabla de atributos (Figura 22).



Figura 22. Medidas de los bloques que se tomaron durante el trabajo de campo.

3.4.1. El área potencial de los desprendimientos (release map).

Tal como se indicó en apartado de consideraciones generales, aquellas áreas con pendientes superiores a los 45° en materiales o rocas duras (calizas, dolomías, granitos, etc.) son susceptibles de producir caídas y desprendimientos de rocas. Así pues, para definir el área fuente o potencial de los desprendimientos en el entorno de Segovia se llevaron a cabo la realización de tres etapas:

a) La definición del umbral de pendiente a la que ocurren los desprendimientos. El umbral de pendiente a la que ocurren los desprendimientos se ha extraído cruzando el mapa de pendientes con el mapa-inventario de los desprendimientos. Además, con el objeto de reducir la incertidumbre de la colocación manual del origen de un desprendimiento, se ha optado por dos aproximaciones para obtener el valor de la pendiente:

- La pendiente individual de cada “punto-desprendimiento” (Figura 23). Para ello se utilizó la herramienta “Extract Values to Points” (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Extraction/ Extract Values to Points).

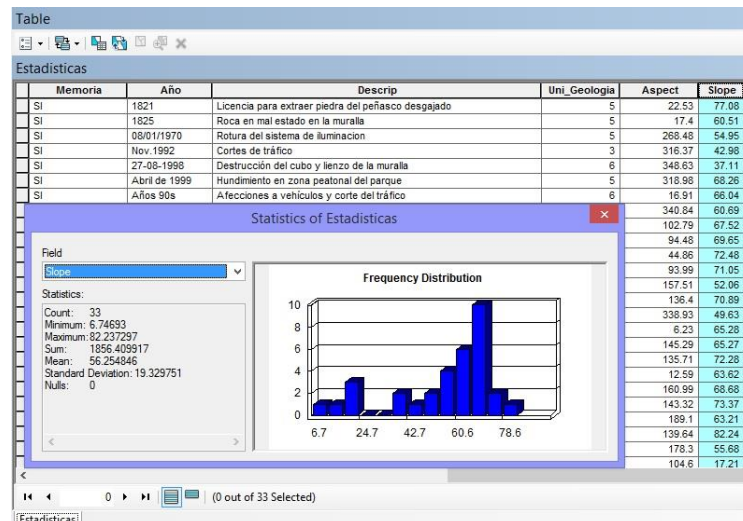


Figura 23. Estadística de la pendiente a partir del tratamiento individual de los puntos-desprendimientos

- La pendiente en un “buffer” de 5 m de cada punto-desprendimiento (Figura 24). En este caso, se generó un buffer, con de las herramientas de geoprocésamiento, a la capa de puntos, que representa, como se ha dicho, el origen de cada desprendimiento. Posteriormente se pudo extraer diferentes estadísticas como la pendiente mínima, máxima y media, mediante la herramienta “Zonal Statistics as Table” (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/ Zonal/ Zonal Statistics as Table). De esta forma también se tiene en consideración la pendiente previa del talud anterior al evento, y que se ha visto modificada con el arranque de material.

b) La obtención del área potencial de los desprendimientos o escarpes. Este mapa se ha obtenido, por tanto, a partir de la reclasificación de las pendientes superiores a 47.62° (herramienta “Reclassify, ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/ Reclass/ Reclassify), y su posterior digitalización en nuevo fichero vectorial (*.shp).

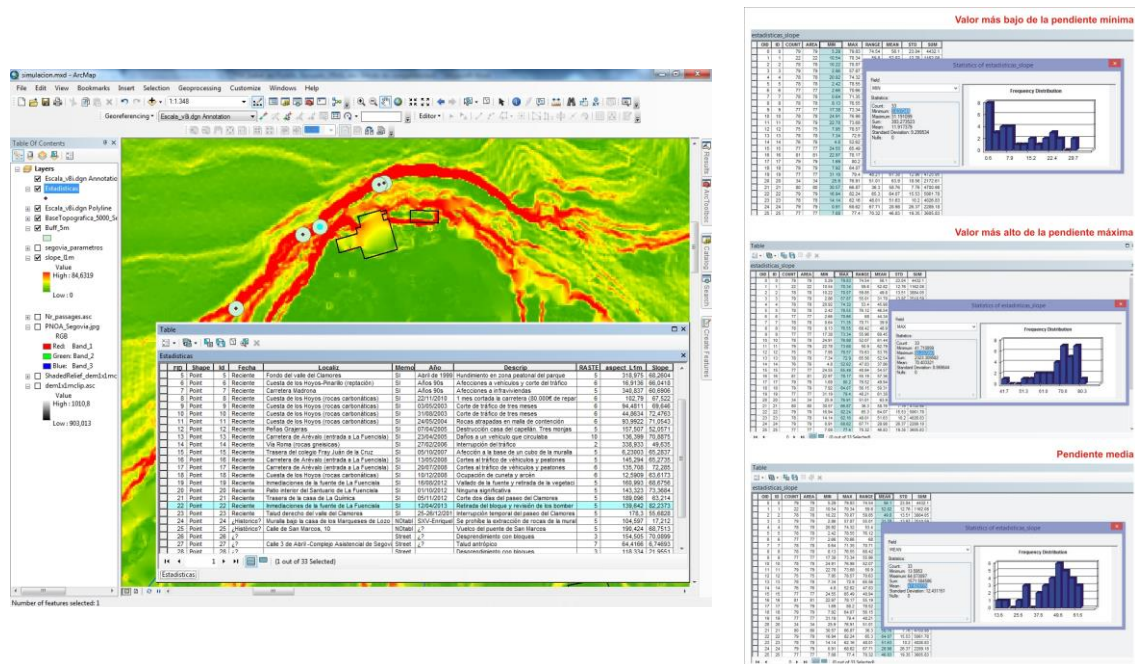


Figura 24. Estadísticas de las pendientes obtenidas a partir del buffer de cada punto-desprendimiento.

c) La definición de las propiedades físicas del área potencial de los desprendimientos o escarpes. El último paso consiste en definir algunas propiedades de los escarpes, como son la densidad de la roca y la forma y el tamaño de los bloques que se pueden desprender. Para ello, se crea en la tabla de atributos cinco campos que contendrán los diferentes valores para cada uno de los escarpes según las especificaciones recogidas en el manual del software Rockyfor3D (Figura 25).

A continuación se detallan los registros que debe tener la capa de escarpes:

- **Rock density:** Esta variable o parámetro representa la densidad de la roca, que puede ir desde los 2.000 a los 3.000 kg/m³ de densidad global. En el área de estudio, como luego se verá, los desprendimientos ocurren fundamentalmente sobre dolomías y areniscas dolomíticas.
- **Shape of the falling block:** La forma de los bloques desprendidos se establece según una valoración de 0 a 4, donde:
 - El 0 indica que no se conoce la forma del bloque, el programa asigna una forma elipsoidal o esférica, dependiendo de los valores introducidos en los campos height, width and length.

-
- The screenshot displays a GIS application window. On the left, a map shows a river area with a red boundary and a blue line. On the right, a table window titled "Rockfall_Scamps" is open, showing a list of polygons with attributes: Shape, rockdenait, blshape, d1, d2, and d3. The table has 20 rows, and the 10th row is highlighted in blue. The status bar at the bottom indicates "(1 out of 168 Selected)".
- | Shape * | rockdenait | blshape | d1 | d2 | d3 |
|---------|------------|---------|------|------|------|
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.54 | 0.38 | 0.35 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.54 | 0.38 | 0.35 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.59 | 0.72 | 0.28 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.32 | 0.19 | 0.28 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.5 | 0.44 | 0.31 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.54 | 0.38 | 0.35 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.6 | 0.45 | 0.38 |
| Polygon | 2500 | 1 | 0.6 | 0.45 | 0.38 |

3.4.2. El mapa de las características del suelo potencialmente afectado por los desprendimientos (soil type map).

34

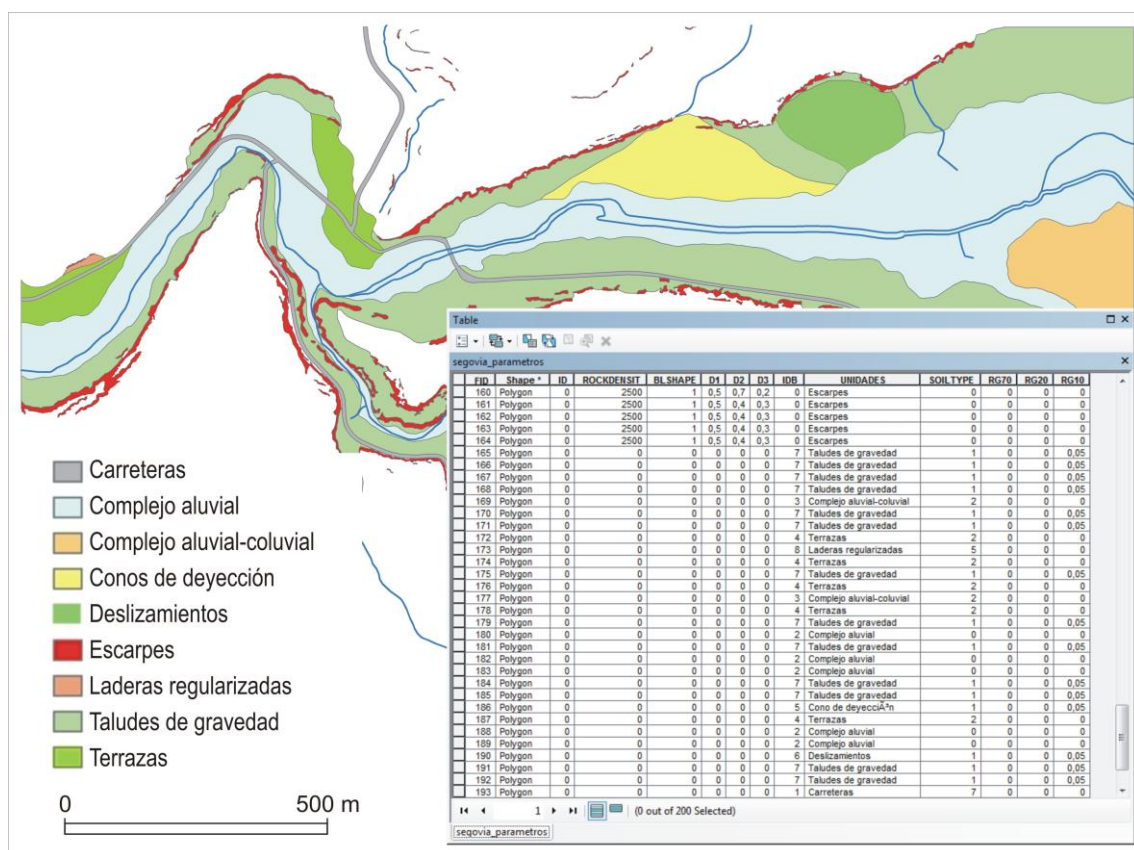


Figura 26. Tabla de atributos de las unidades geomorfológicas con los registros necesarios para la simulación.

Las propiedades físicas de las unidades morfológicas por las que puede desplazarse un bloque desprendido, vienen definidas, como se explicó en el apartado de consideraciones generales, por la rugosidad de la superficie, entendida como los obstáculos que pueden existir en una ladera (otros bloques, árboles, etc.) y por las propias características de suelo, sustrato o formación superficial, pues determinará que éstas absorban una mayor energía al recibir el impacto de un bloque.

Al igual que en el mapa anterior, se crean 4 campos nuevos (Figura 25) en la tabla de atributos para definir en tres de ellos la rugosidad de la superficie, y en el último las características del suelo. De igual modo, el manual del programa de simulación incluye unos valores típicos que indican el tipo de rugosidad y el tipo de suelo.

- **La rugosidad de la superficie de la ladera** (slope surface roughness): Está compuesta por tres propiedades (**rg70**, **rg20** y **rg10**) que indican la rugosidad de la superficie teniendo en cuenta los bloques depositados sobre una ladera, que pueden ser obstáculos para los bloques que se desprenden. Los parámetros rg70,



rg20 y rg10 representan la altura de los obstáculos que se encuentran en la ladera, es decir, que indican el porcentaje (70%, 20% y 10%) de la cobertura de la ladera por bloques de una determinada altitud (metros). Por ejemplo, el 20% de una ladera puede estar cubierto por bloques de 0,3 metros. Para fijar los valores de rg70, rg20 y rg10 se propone utilizar la siguiente tabla:

Size of the Surface roughness (MOH)	Possible Rg values (in m)
No roughness, obstacles absent	0
> 0 - 10 cm	0.3, 0.05, 0.08, 0.1
> 10 - 50 cm	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5
> 50 cm – 1 m	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1
> 1 – 2.5 m	1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2, 2.5
> 2.5 - 10 m	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
> 10 m	100

Tabla 2. Relación de posibles medidas que indican la altura de los obstáculos que cubren una ladera (MOH). Fuente: Dorren L.K.A., 2015. Rockyfor3D (v5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper [www.ecorisq.org]

- **El tipo de suelo** (soil type): Representa la elasticidad de la superficie en función de sus propiedades físicas, y comprende 8 tipos de suelos que se deben asignar siguiendo como referencia la siguiente tabla:

Soiltype	General description of the underground	mean R_n value	R_n value range
0	River, or swamp, or material in which a rock could penetrate completely	0	0
1	Fine soil material (depth > ~100 cm)	0.23	0.21 - 0.25
2	Fine soil material (depth < ~100 cm), or sand/gravel mix in the valley	0.28	0.25 - 0.31
3	Scree (\varnothing < ~10 cm), or medium compact soil with small rock fragments, or forest road	0.33	0.30 - 0.36
4	Talus slope (\varnothing > ~10 cm), or compact soil with large rock fragments	0.38	0.34 - 0.42
5	Bedrock with thin weathered material or soil cover	0.43	0.39 - 0.47
6	Bedrock	0.53	0.48 - 0.58
7	Asphalt road	0.35	0.32 - 0.39

Tabla 3. Los tipos de suelo utilizados por Rockyfor3D. Fuente: Dorren L.K.A., 2015. Rockyfor3D (v5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper [www.ecorisq.org].

3.4.3. Generación de los mapas raster.

Con la finalidad de utilizar las variables que demanda el programa de simulación de desprendimientos (Rockyfor3D), el conjunto de los 9 campos que definen las



propiedades físicas del área potencial y área de recepción de los bloques desprendidos, junto con el MDE, se transformaron a mapas raster en formato ASCII (*.asc); para ello se utiliza la herramienta “Raster to ASCII” (ArcToolbox/Conversions Tools/From Raster/).

Capítulo IV: Resultados. Reconocimiento y análisis de los desprendimientos



4.1. El mapa-inventario de los desprendimientos y la tabla de atributos asociada.

El inventario de los desprendimientos en el entorno de Segovia cuenta con 33 eventos, cuya tabla de atributos recogen para cada uno de ellos información sobre la localización, una breve descripción, la unidad geológica sobre la que se ha producido, la orientación, pendiente y edad relativa (Figura 27). A partir de esta información se ha podido realizar un análisis estadístico de las variables que más influyen como factores condicionantes.

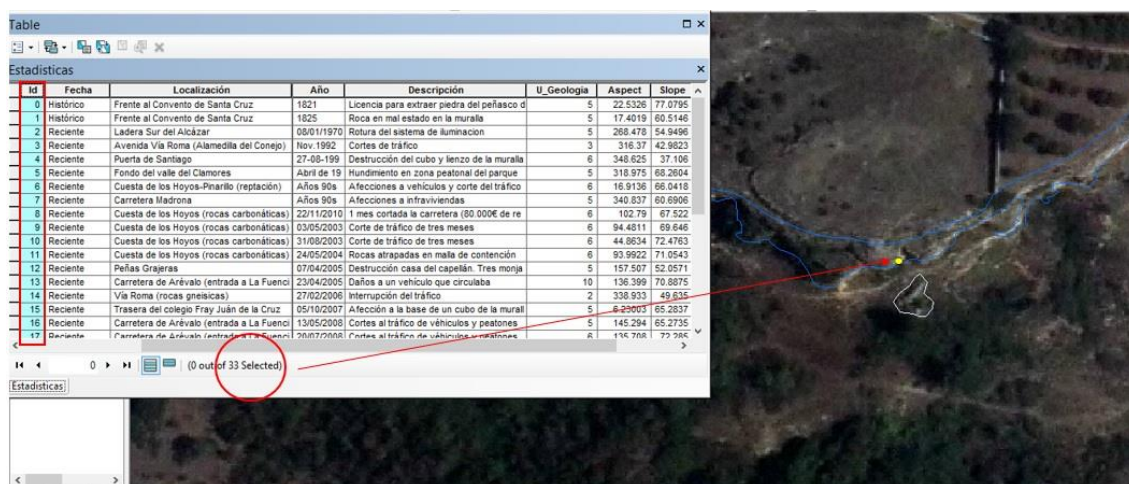


Figura 27. Detalle del inventario donde cada uno de los registros de la base de datos representa un desprendimiento. Los desprendimientos aparecen en amarillo, los bloques en blanco y los escarpes en azul.

4.2. Las características litológicas de los desprendimientos.

Desde un punto de vista geológico, la observación del mapa (Figura 28) muestra cómo el origen de los desprendimientos se localiza principalmente sobre los afloramientos cretácicos de naturaleza calcárea. En concreto sobre las unidades “Arenas pardas, areniscas y arcillas” (unidad 5) y “Areniscas con cemento dolomítico” (unidad 6); esta última muestra espesores en torno a los 40 metros. En la primera unidad se han localizado 16 desprendimientos que suponen aproximadamente el 50% del total; y en la segunda, se han identificado 11, que representan un 33% (Tabla 4). En todo caso, la localización exacta entre ambas unidades no deja de tener cierta incertidumbre, ya que el mapa geológico está realizado a escala 1:50.000. En la unidad 5, los desprendimientos ocurren sobre los estratos de las areniscas dolomíticas por descalce de las arenas y arcillas infrayacentes (Díez-Herrero et al., 2016).



Unidad geológica	Denominación	Desprendimientos	
		Número	%
1	Adamellitas-Granodioritas deformadas	0	0.00
2	Ortogneises granulares mesocratos-melanocratos	1	3.03
3	Arenas, arcillas y gravas	3	9.09
4	Dolomías tableadas, margas y arcillas	0	0.00
5	Arenas pardas, areniscas y arcillas	16	48.48
6	Areniscas con cemento dolomítico	11	33.33
7	Margas, dolomías y areniscas	1	3.03
8	Dolomías, margas y arcillas	0	0.00
9	Cantos, bloques y arenas	0	0.00
10	Gravas, arenas y limos	1	3.03
11	Arenas, limos, gravas y cantos aluviales (fondo de valle)	0	0.00
12	Antrópico	0	0.00
Total		33	100

Tabla 4. Relación de litologías según número de desprendimientos

CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DEL ENTORNO DE SEGOVIA

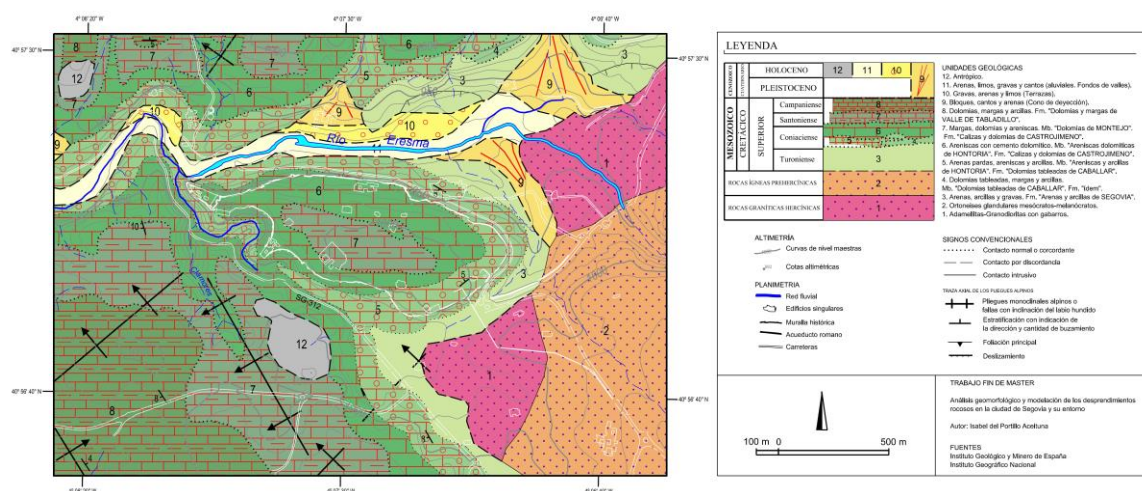


Figura 28. Mapa con las unidades geológicas comprendidas en el área de estudio. Nota: En el anexo cartográfico se incluye una versión ampliada del mapa.



4.3. Las características topográficas de los desprendimientos: pendientes y orientaciones.

La pendiente y la orientación constituyen otras dos variables que condicionan la ocurrencia de los desprendimientos. De hecho, tal como se ha explicado en la metodología, la elevada pendiente en rocas duras o compactas se identifica como el área potencial de potenciales caídas de rocas y desprendimientos.

Por tanto, a través de las estadísticas se definió la pendiente mínima, máxima y media para cada método (Tabla 5) de los tres MDE. Se puede apreciar que la pendiente media, usando la aproximación individual, es similar en los MDE con resolución de 5 m (unos 47°), y bastante más elevada en el MDE-LiDAR (56,25°).

	Puntos	Pendiente mínima (°)	Pendiente máxima (°)	Pendiente media (°)
Modelo Digital de Elevación a partir del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000				
Puntos individuales	33	17,52	72,33	47,93
Puntos "buffer 5 m"	33	9,24	72,33	44,95
Modelo Digital de Elevación a partir del LiDAR de 5×5 m				
Puntos individuales	33	10,07	71,16	47,38
Puntos "buffer 5 m"	33	8,16	71,16	47,22
Modelo Digital de Elevación a partir del LiDAR de 2×2 m				
Puntos individuales	33	6,74	82,23	56,25
Puntos "buffer 5 m"	33	0,63	82,23	47,62

Tabla 5. Resumen de los datos de pendiente obtenidos a partir de diferentes métodos

En cambio, al utilizar el buffer, se observa como en los tres MDE la pendiente es bastante similar, situándose entre 44,9° y 47,62°.

Finalmente, dado que la simulación de los desprendimiento se realizó con el MDE-LiDAR 2x2 m, se puede señalar que la aproximación realizada por ambos métodos ha permitido obtener la pendiente media a la que ocurren los desprendimientos; en los datos tratados manualmente, es de 56,25°; mientras que con la utilización de un buffer, la pendiente media es de 47,72° (Figura 29). Finalmente, este último valor es el que se ha empleado para obtener el área potencial de los desprendimientos, considerando que el valor más elevado podría no reflejar todos los desprendimientos potenciales.

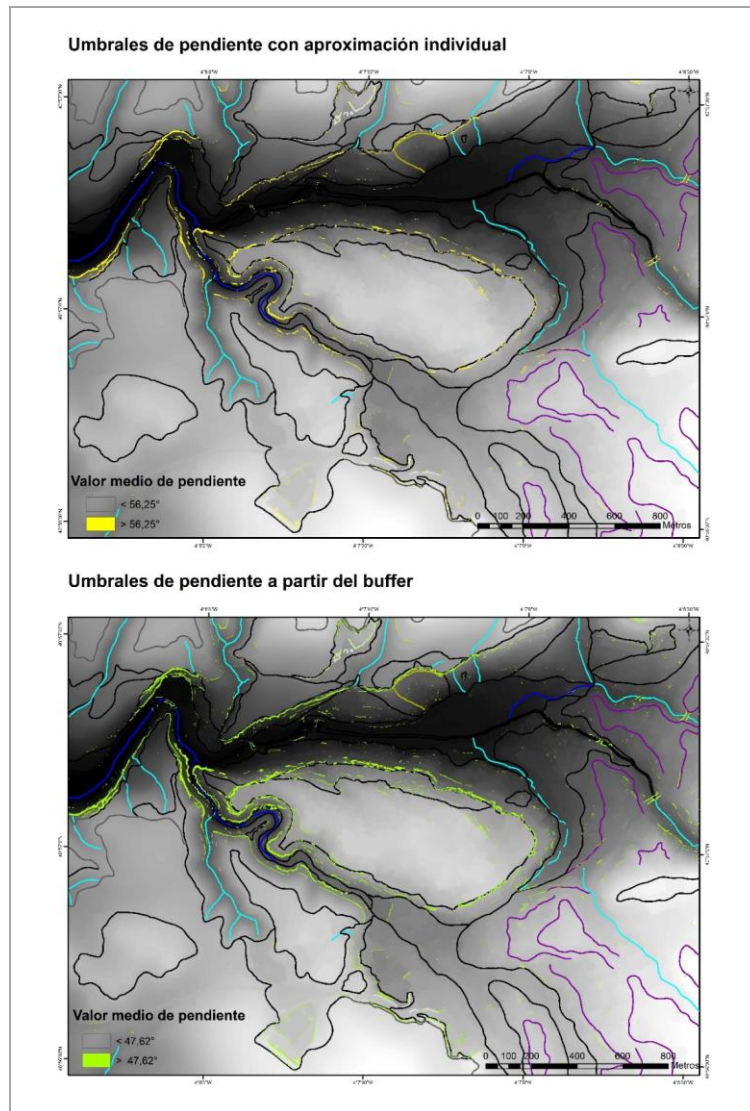


Figura 29. Reclasificación de las pendientes considerando los dos umbrales

En los tres MDE, la pendiente media a la que ocurren los desprendimientos se sitúa prácticamente por encima de los 45° , oscilando entre los $47,38^\circ$ y $56,25^\circ$, cuando se ha obtenido la pendiente directamente del punto origen de los desprendimientos; y entre $44,95^\circ$ y $47,62^\circ$ cuando se ha obtenido mediante un buffer de 5 metros a cada punto origen.

Por su parte, el análisis de los resultados de la variable orientación refleja que los desprendimientos ocurren, en los tres MDE, principalmente en dos orientaciones: norte y sureste (Figura 30).

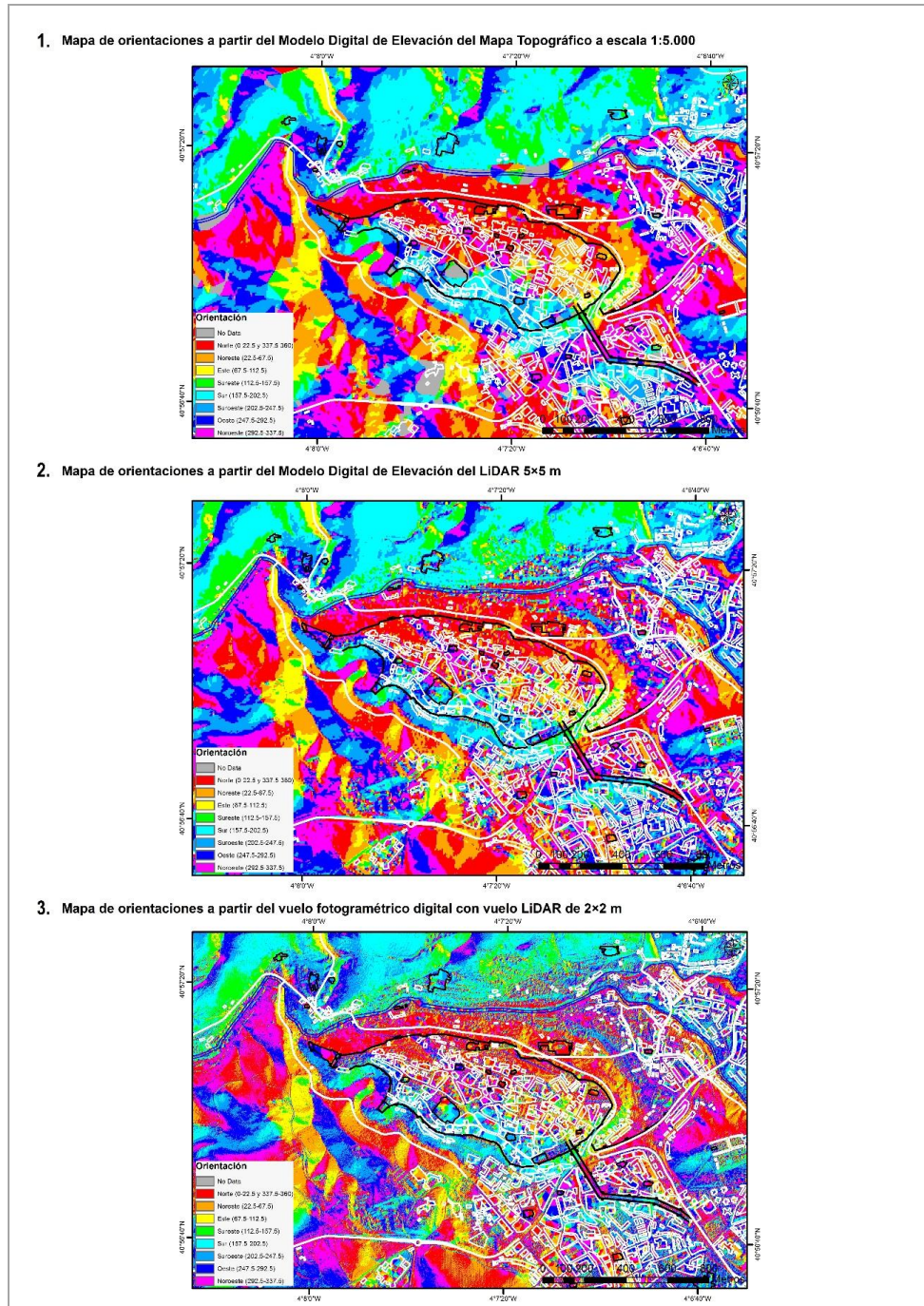


Figura 30. Mapas que muestran la comparación de las orientaciones a partir de los MDE.

Aunque en detalle se aprecian algunos matices en relación a la procedencia del MDE (Tabla 6), así por ejemplo la orientación norte es más manifiesta en el MDE-LiDAR 5x5 m, representando cerca del 40%, mientras que en el MDE-MTN-5000, la orientación norte y sureste tienen idéntica representación (30,30% respectivamente). En cambio en el MDE-LiDAR 2x2 m, la orientación norte no llega al 30%, y la sureste se mantiene en torno al 24%.



		Desprendimientos	
	Orientación	Número	%
Modelo Digital de Elevación a partir del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000	Norte (0-22,5° y 337,5-360°)	10	30.30
	Noreste (22,5-67,5°)	2	6.06
	Este (67,5-112,5°)	4	12.12
	Sureste (112,5-157,5°)	10	30.30
	Sur (157,5-202,5°)	0	0.00
	Suroeste (202,5-247,5°)	4	12.12
	Oeste (247,5-292,5°)	1	3.03
	Noroeste (292,5-337,5°)	2	6.06
	Total	33	100
	Orientación	Número	%
Modelo Digital de Elevación a partir del LiDAR de 5x5 m	Norte (0-22,5° y 337,5-360°)	12	36.36
	Noreste (22,5-67,5°)	2	6.06
	Este (67,5-112,5°)	5	15.15
	Sureste (112,5-157,5°)	9	27.27
	Sur (157,5-202,5°)	4	12.12
	Suroeste (202,5-247,5°)	0	0.00
	Oeste (247,5-292,5°)	0	0.00
	Noroeste (292,5-337,5°)	1	3.03
	Total	33	100
	Orientación	Número	%
Modelo Digital de Elevación a partir del LiDAR de 2x2 m	Norte (0-22,5° y 337,5-360°)	9	27.27
	Noreste (22,5-67,5°)	4	12.12
	Este (67,5-112,5°)	5	15.15
	Sureste (112,5-157,5°)	8	24.24
	Sur (157,5-202,5°)	4	12.12
	Suroeste (202,5-247,5°)	0	0.00
	Oeste (247,5-292,5°)	1	3.03
	Noroeste (292,5-337,5°)	2	6.06
	Total	33	100

Tabla 6. Resumen del número de desprendimientos por rangos de orientación

Tomando como ejemplo, los datos del MDE-LiDAR 2x2 m, se ha construido un histograma frecuencias (Figura 31), dividido en umbrales de pendiente, en el que se aprecia sobre qué intervalo se produce el mayor número desprendimientos. Tal como se observa, la mayor parte de los eventos se acumulan entre los umbrales de 55° y 90° de pendiente.

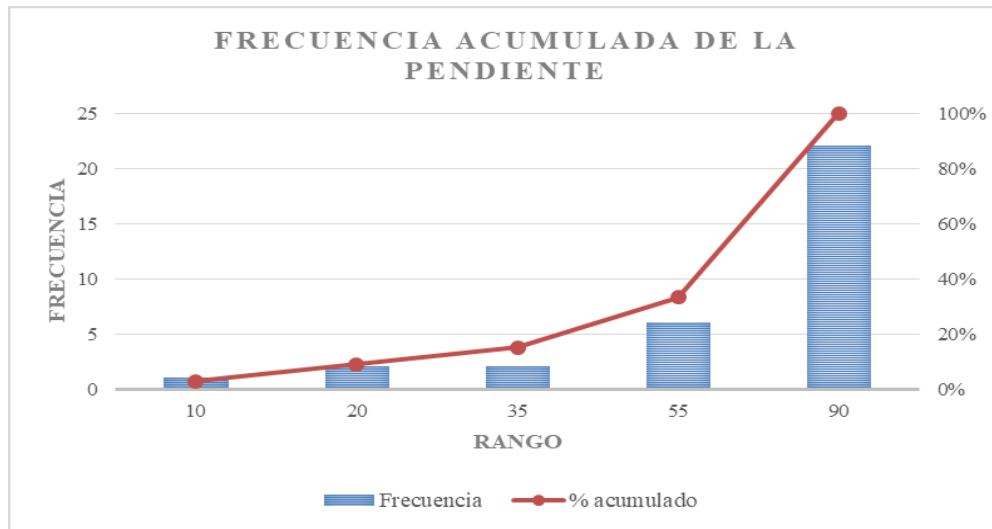


Figura 31. Histograma de frecuencia que muestra la acumulación de desprendimientos por pendientes.

Por otro lado, la correlación estadística entre ambas variables (Figura 32) muestra un coeficiente de correlación que oscila desde 1 a -1, siendo el resultado de 0,02; lo que indica, que es una relación directa a pesar de tener un valor positivo muy bajo. El R^2 es muy bajo (0,0004) y parece señalar ausencia de relación; si bien se muestran algunos puntos con pendientes elevadas y orientación Norte. Se concentran cinco puntos entre los 60° y 80° de pendiente que se corresponden con valores comprendidos entre 0° y $22,5^\circ$ de orientación Norte. Sucede lo mismo, con el resto del intervalo que muestra el Norte ($337,5^\circ - 360^\circ$). En él, se encuentran tres puntos más con los siguientes valores: 349° de orientación Norte, con una pendiente de 37° ; 50° de orientación Norte, con una pendiente de 50° y 341° de orientación Norte con 61° de pendiente.

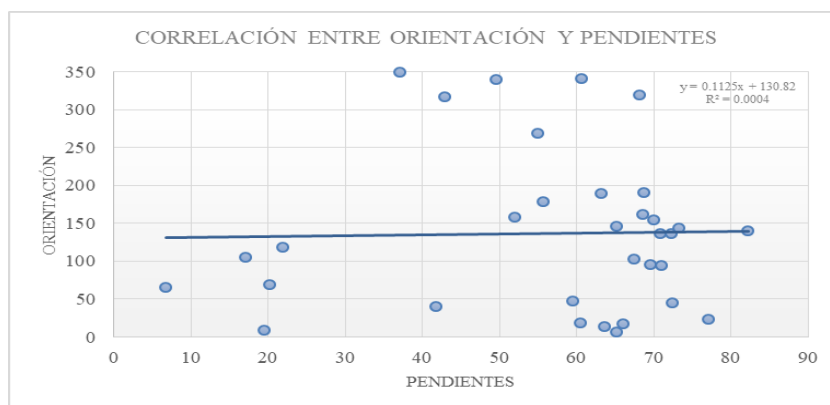


Figura 32. Relación de dispersión entre orientación y pendientes.



4.4. Las características geomorfológicas de los desprendimientos.

El gran número de procesos gravitacionales en el entorno de la ciudad de Segovia, se debe en gran medida a su singular emplazamiento (Díez-Herrero y Martín-Duque, 1993). Como se comentaba al describir el área de estudio, el encajamiento del río Eresma y afluentes ha modelado sobre las unidades calcáreas del Cretácico superior valles de tipo cañón, cuyo rasgo más característico son vertientes de escarpe-talud. Efectivamente, en la cartografía se aprecia la localización del origen de los desprendimientos en los escarpes o cornisas de los cañones.

CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA DEL ENTORNO DE SEGOVIA

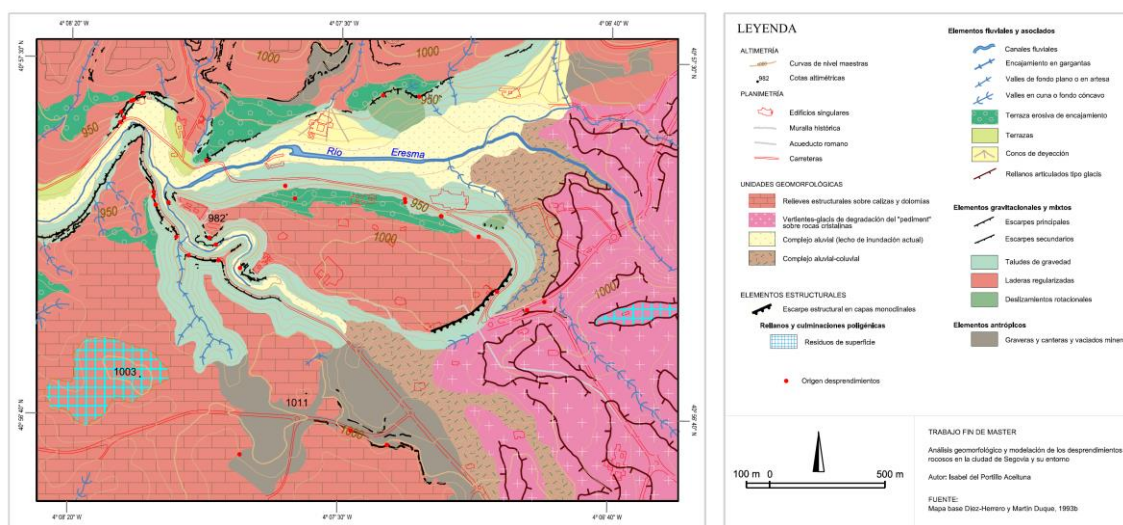


Figura 33. Mapa geomorfológico del área de estudio. Nota: en el anexo cartográfico se muestra una versión ampliada del mapa.

También, el encajamiento de los ríos Eresma y Clamores (Figura 34) que han modelado tramos de valles con meandros encajados (meandro del Santuario de La Fuencisla, meandro del paseo de Clamores) determina la presencia de paredes verticales, que favorecen el desencadenamiento de desprendimientos.

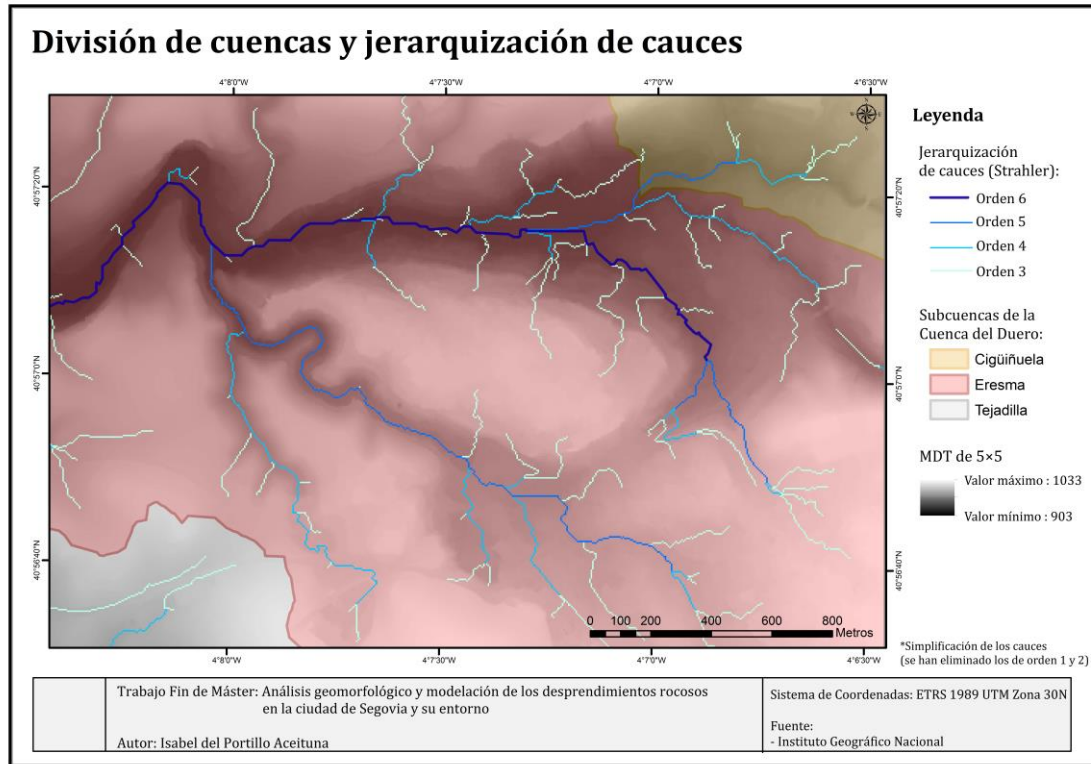


Figura 34. Jerarquización de cauces a partir del método Strahler. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Geográfico Nacional.

4.5. Las características meteorológicas de algunos desprendimientos recientes.

Se han analizado las temperaturas y precipitaciones diarias que caracterizaron tres desprendimientos recientes, y que fueron noticia por sus consecuencias sociales y económicas. Se ha prestado especial atención a los días hielo-deshielo efectivos en relación a la humedad, estimada a partir de las precipitaciones que hubiera antes de la fecha de cada evento.

4.5.1. Desprendimiento en el meandro del Santuario de Nuestra Señora de La Fuencisla. Tuvo lugar el día 7 de abril de 2005, sobre la ladera de la margen derecha del río Eresma, con una orientación de $156,42^\circ$ y una pendiente de $56,05^\circ$, ocasionando importantes daños en el Santuario e hiriendo a tres religiosas; para su análisis se han recogido y tratado estadísticamente los valores desde el 1 de octubre de 2004 al 30 de abril de 2005 (Figura 35).

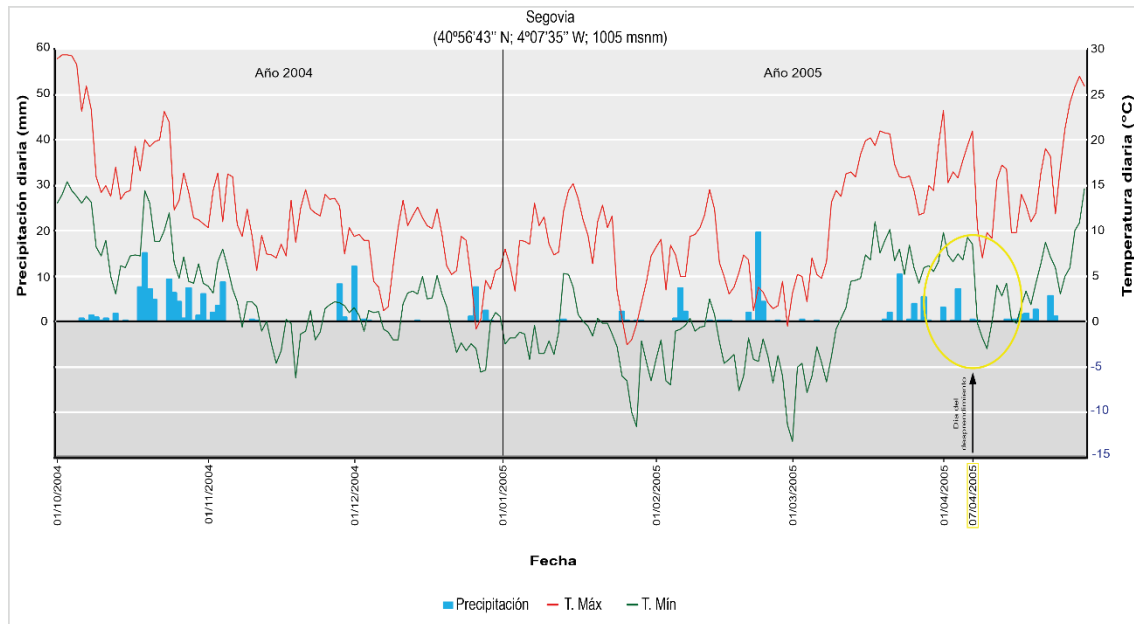


Figura 35. Datos diarios de precipitaciones y temperaturas para el desprendimiento acontecido en el meandro del Santuario de Nuestra Señora de La Fuencisla. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Agencia Estatal de Meteorología.

A lo largo de la serie de observación aparecen tres los períodos en que la temperatura máxima es inferior a 0°C con valores de -2,6°C, -2°C y -0,8°C, que se corresponden con una temperatura mínima de -3°C, -6°C y -13,2°C respectivamente. Se trata por tanto de un invierno bastante frío donde las heladas fueron significativas, y además, con importante presencia de humedad. Cabe señalar las abundantes precipitaciones previas (más de 20 mm acumulado) al descenso brusco de las temperaturas, que alcanzaron los valores más bajos registrados (-11,6°C y -13,2°C). Por tanto en estas fechas los ciclos de hielo-deshielo pudieron tener una incidencia geomorfológica. En los días previos al desprendimiento se sucedieron varios días con precipitaciones que pudieron “empapar” una roca, aumentando su peso, y finalmente desencadenar el evento. Estas condiciones meteorológicas apuntan a la idea de Díez-Herrero et al., 2014, para quienes los factores desencadenantes pudieron ser “fácilmente la termoclastia y crioclastia a la que estuvo sometida toda esta región el invierno de 2005, en el que se produjeron muchas y muy intensas heladas. A falta de estudios específicos, pensamos que también pudo influir la orientación sur de la ladera, la cual, ante fenómenos de helada se ve sometida a muchos más procesos de hielo-deshielo que laderas similares orientadas hacia el norte (dado que estas permanecen siempre heladas durante continuados periodos de tiempo)”.



4.5.2. Desprendimiento en el paraje de la Cuesta de los Hoyos. Ocurrió en el día 22 de noviembre de 2010, en la ladera de la margen izquierda del arroyo Clamores, con una orientación de $101,35^\circ$ y una pendiente de $60,66^\circ$, afectando el desprendimiento a la carretera autonómica SG-312. Para este evento se han empleado datos desde el 1 de octubre de 2010 al 31 de marzo de 2011 (Figura 36).

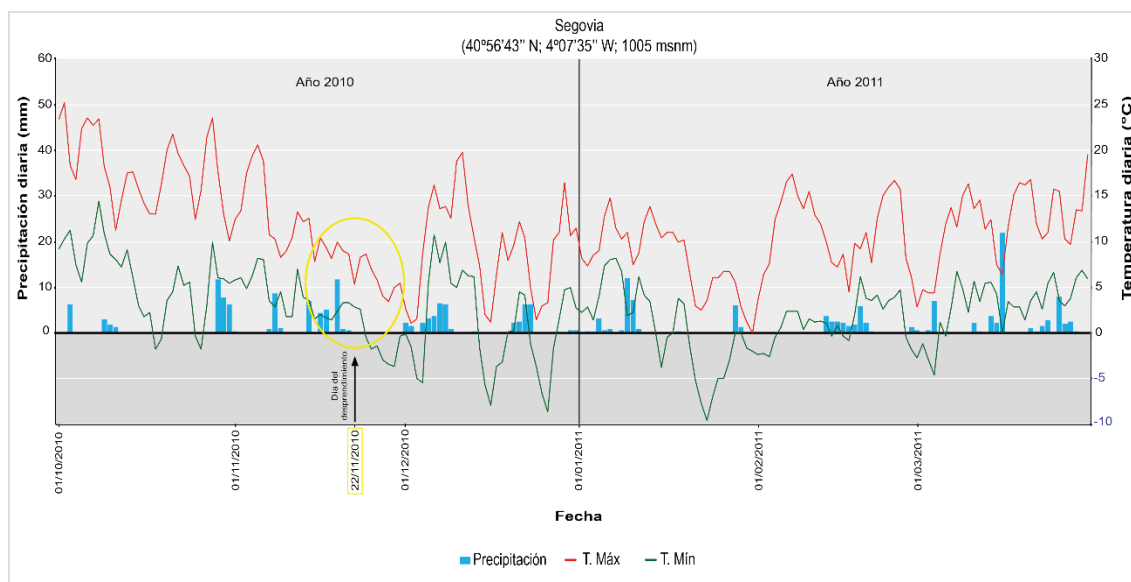


Figura 36. Datos diarios de precipitaciones y temperaturas para el desprendimiento acontecido en el paraje de la Cuesta de los Hoyos. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Agencia Estatal de Meteorología.

La serie analizada se inicia con temperaturas positivas, que descienden bruscamente, alcanzando la temperatura mínima dos días consecutivos con un valor de $-1,8^\circ\text{C}$ en ambos casos, mientras que se registran unas temperaturas máximas de $21,8^\circ\text{C}$ y de $23,5^\circ\text{C}$ los días posteriores. Esto indica que antes del evento hubo una gran amplitud térmica entre el día y la noche, y, asimismo las precipitaciones fueron importantes los días previos al desprendimiento. Concretamente, el día anterior al desprendimiento queda registro de una precipitación de 11,7 milímetros.

4.5.3. Desprendimiento en el paseo del arroyo de Clamores. Este evento sucedió el 26 de diciembre de 2013, sobre la ladera de la margen derecha del arroyo Clamores, que presenta una orientación de $175,29^\circ$ y el punto posible de la rotura tiene una pendiente de $55,16^\circ$. Aunque este desprendimiento no ocasionó daños, los bloques acabaron depositados en la base del talud, alcanzando una senda muy transitada (Figura 4). Los

datos climáticos analizados van desde el 1 de octubre de 2013 al 31 de marzo de 2014 (Figura 37).

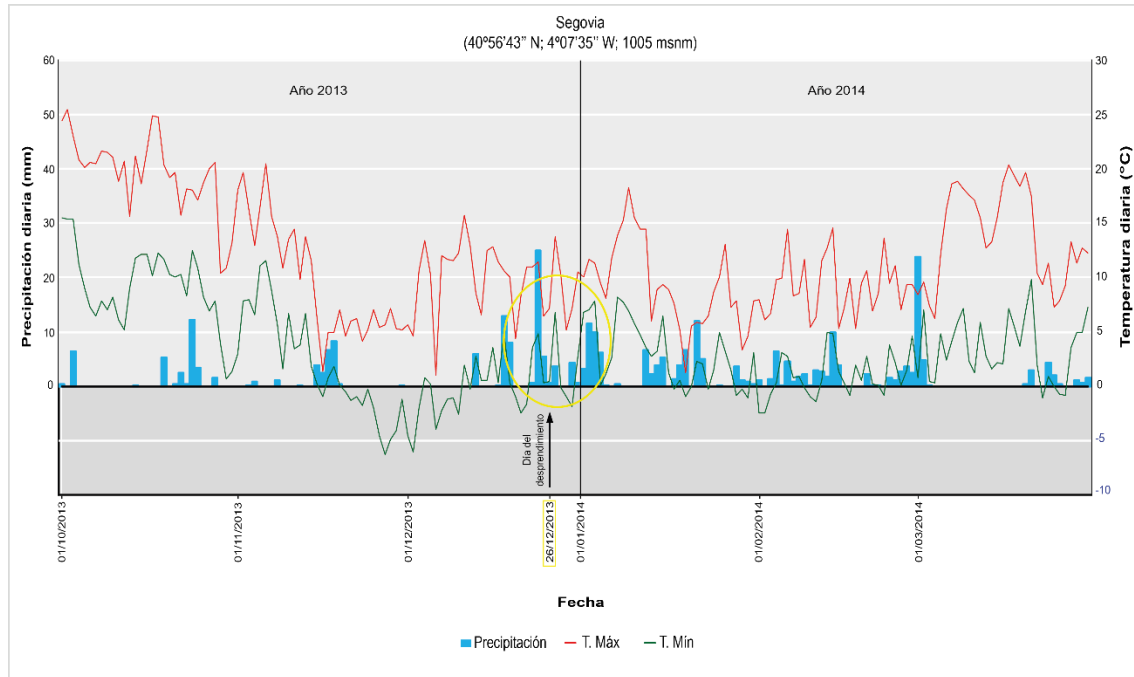


Figura 37. Datos diarios de precipitaciones y temperaturas para el desprendimiento acontecido en el arroyo de Clamores. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Agencia Estatal de Meteorología.

El análisis de los datos muestra de nuevo un importante periodo de heladas previo al desprendimiento, en el que las temperaturas mínimas alcanzan los -6.3°C durante algunos días. También, las precipitaciones son importantes, así los días antes del desprendimiento se registran valores de 13,8 y 25 mm, unidos a temperaturas por debajo de los 0°C .

Capítulo V: Resultados. Modelización de los desprendimientos



5.1. Ejecución del programa de simulación Rockyfor3D: Parámetros de entrada y salida

Como se explicó en la metodología, el programa de simulación de los desprendimientos Rockyfor3D precisa conocer los parámetros o propiedades básicas del área fuente o potencial de los desprendimientos (escarpes) y de las áreas por las que se desplazaran los bloques (generalmente taludes de gravedad). Estos parámetros se organizan en 10 mapas en formato ASCII* (Figura 38), que son:

- El MDE, obtenido del MDE LiDAR 2x2 m, estableciéndose una resolución de 1 metro.
- Cinco mapas para definir las propiedades de área fuente (o release map), la densidad de la roca, la forma de los bloques y el tamaño de los bloques que pueden desprenderse (un mapa por cada una de las medidas: eje mayor, eje menor y espesor),
- Cuatro mapas para expresar las propiedades de los taludes (soil type map): el tipo de suelo, y la rugosidad de la superficie, reflejada en tres mapas (Rg70, Rg20 y Rg10) según la proporción de obstáculos que pueda encontrarse un bloque.

En conjunto, los 10 ficheros ASCII* de entrada deben tener la misma extensión que el MDE empleado, el mismo tamaño de celda (en este caso, de 1 metro) y el mismo encabezado para que se ejecute el programa de simulación sin problemas.

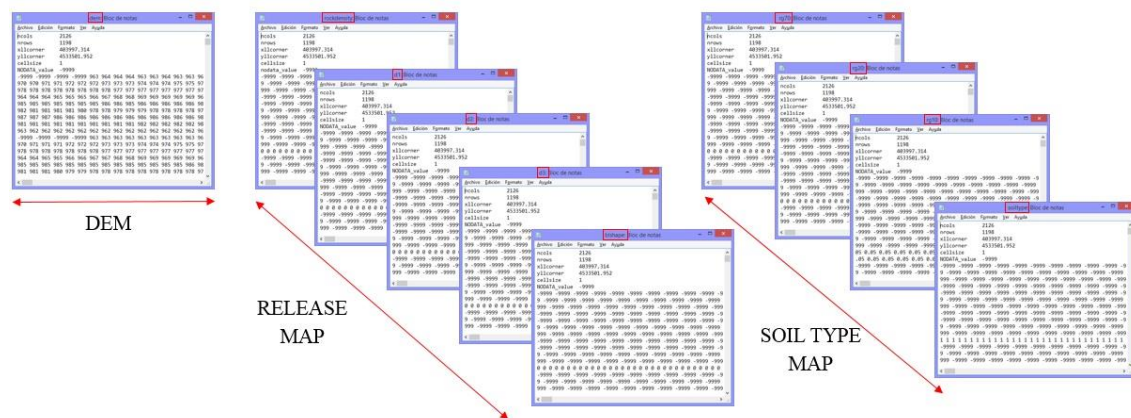


Figura 38. Jerarquía de los parámetros de entrada para realizar la simulación.

Con los 10 ficheros ASCII* generados se puede ejecutar el programa. A continuación se muestran los pasos realizados (Figura 39):

- El primer paso es elegir el directorio de trabajo donde se han guardado los archivos ASCII* necesarios.
- Definir las configuraciones de la simulación (número de simulaciones, variación del volumen de roca, el uso de una simulación con árboles y mallas de protección).
- La simulación se inicia pulsando el botón correspondiente (*Run Simulation*).
- Si se conocen errores, el usuario será informado en la ventana *Messages*.
- Los datos de salida se guardan en el mismo directorio de trabajo establecido al comienzo y también se muestran en la ventana *Messages*.

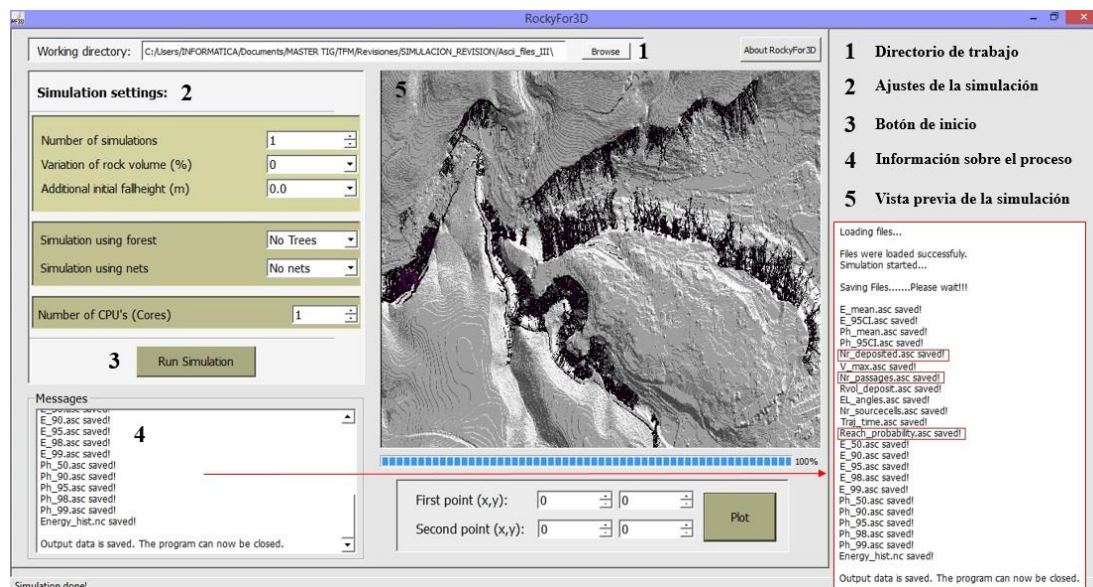


Figura 39. Interface del programa Rockyfor3D y los pasos seguidos para ejecutar la simulación.

Todos los archivos de salida que crea el programa están en formato ESRI ASCII Grid (raster) y pueden ser directamente abiertos y visualizados en la mayoría de programas GIS (Figura 40). Estos ficheros de salida aparecen citados en la ventana *Messages*.

Los mapas (o ficheros) que se obtienen de la simulación son los siguientes:

- E_mean.asc: La media de los valores de energía cinética (traslacional y rotacional) de todos los bloques simulados en una celda dada (en kJ).



- b) E_50.asc, E_90.asc, E_95.asc, E_98.asc y E_99.asc: Estos raster representan la media y el percentil 90, 95, 98 y 99 de la energía simulada por celda. La salida se da en números enteros y se rige por clases energéticas expresadas en kJ.
- c) E_95.asc: Define el intervalo de confianza del 95%, es decir, la desviación estándar de los valores máximos de energía cinética (en kJ) registrados en cada celda.
- d) Ph_mean.asc: Es la media de la altura de paso (en metros) medida en dirección a la superficie de la pendiente del centro de gravedad de todos los bloques que pasaron a través de una celda.
- e) Ph_50.asc, Ph_90.asc, Ph_95.asc, Ph_98.asc y Ph_99.asc: Estos raster representan la mediana y el percentil 90, 95, 98 y 99 de las alturas de paso (en metros, medida en dirección a la pendiente) del centro de gravedad del bloque. La salida se da en números enteros y se corresponde con diferentes clases de altura.
- f) Ph_95I.asc: Es el intervalo de confianza del 95% de todos los valores máximos de altura (en metros, medidos en dirección a la pendiente) registrados por celda.
- g) Nr_passages.asc: Es uno de los mapas representativos y utilizados. En este TFM se ha empleado para observar el número de bloques que pasan a través de una celda, y muestra las trayectorias seguidas por cada bloque hasta que se detienen.
- h) Nr_sourcecells.asc: Muestra para cada destino, la celda de origen de los diferentes bloques que pasan por ella.
- i) Reach probability.asc: Es otro de los mapas más empleados. Con él, se establece la probabilidad de alcance o las áreas que pueden verse afectadas por el desplazamiento de una roca.
- j) Nr_deposited.asc: Igual que el anterior, es un mapa muy empleado para conocer el número de bloques detenidos en cada celda.
- k) Rvol_deposit.asc: Es el volumen máximo del bloque (en m³) detenido en cada celda.
- l) EL_angles.asc: Representa los ángulos mínimos de la línea virtual entre el punto de parada y la localización de origen de un bloque desprendido. Es útil para zonas con vegetación.



- m) Traj_time.asc: Es el tiempo mínimo necesario para llegar a una celda raster desde la celda de origen del desprendimiento.
- n) V_max.asc: La velocidad simulada por celda raster.

5.2. Resultados procedentes de la simulación

En este TFM se presentan dos simulaciones preliminares que persiguen encontrar áreas prioritarias a la susceptibilidad al alcance por desprendimientos de rocas, de modo que algunas de las propiedades, especialmente de los taludes se han simplificado. Con respecto al área-fuente o escarpes, la densidad de la roca se ha establecido a partir de estudios (Winkler, 1973 y Komar, 1987, tomado de García Casco -on-line-) que indican que para el caso de las calizas o dolomías o areniscas dolomíticas, la densidad oscila entre 2400 y 2500 kg/ m³. La forma y tamaño de los bloques se ha establecido a partir de trabajo de campo donde se midieron los ejes de un número de bloques, y también se ha tenido en cuenta el espesor medio de los bancos o estratos de las rocas, que se sitúa en torno a los 70 cm (Díez-Herrero, com. pers.). Así, los bloques presentan una forma rectangular, y se les ha dado en valor 1 = bloques rectangulares, según las especificaciones del manual de Rockyfor3D. Por su parte se han ejecutado dos simulaciones cambiando el valor del tamaño de los bloques, resultando dos escenarios. El tamaño medio empleado en la primera simulación ha sido: d1 (height) = 0,30 m, d2 (width) = 0,53 y d3 (length) = 0,70 m; mientras en la segunda, el tamaño medio ha sido de: d1 (height) = 0,70 m, d2 (width) = 0,53 y d3 (length) = 0.30 m, es decir se ha modificado el eje de los bloques, pues el valor d1 se corresponde con el eje mayor (Dorren, com. pers.).

En cambio, las propiedades de las unidades geomorfológicas e infraestructuras (carreteras) que pueden ser recorridas por un desprendimiento se recogen en la (tabla 3) se han mantenido igual en ambas simulaciones. Cómo se aprecia la mayor simplificación se ha realizado al indicar la rugosidad de la superficie, pues se ha considerado en su práctica totalidad con valor, lo que indicaría ausencia de obstáculos durante el recorrido de los bloques; y, por lo tanto, no se ha tenido en cuenta en la simulación preliminar en este TFM, el papel de la vegetación, pues incorporar este parámetro hubiera requerido un trabajo de campo exhaustivo para determinar la densidad de la cobertera, el diámetro medio de los troncos de los árboles, etc.

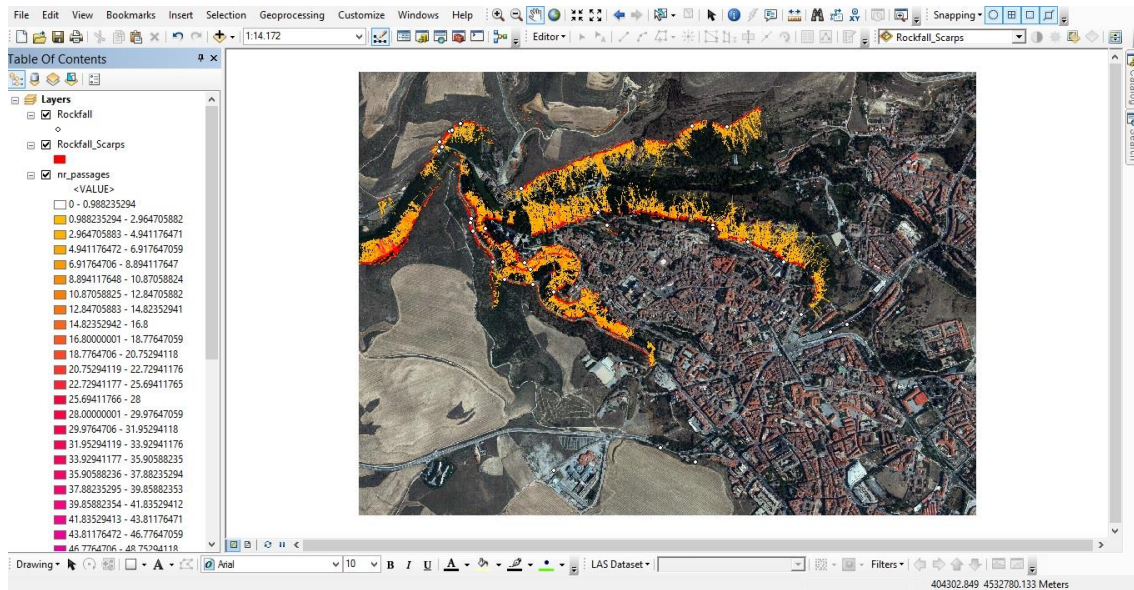


Figura 40. Fichero Nr_passages abierto en el programa ArcGIS.

Una vez ejecutada la simulación, se ha abierto con ArcGIS el mapa “Nr_passages.asc”, que muestra las trayectorias y alcance de los bloques (Figura 40) sobre una ortofoto. Además, se han elaborado dos salidas gráficas procedentes de cada simulación:

- a) Mapa de susceptibilidad empleando como tamaño medio de los bloques: d1 (height) = 0,30 m, d2 (width) = 0,53 y d3 (length) = 0,70 m. Con la finalidad de mostrar la susceptibilidad al alcance por desprendimientos en relación con los bienes expuestos se ha preparado una salida gráfica que incluye el mapa de la simulación (Nr_passages.asc) superpuesto al mapa de sombras (Hillshade) elaborado a partir del MDE LiDAR 2x2 m (ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Surface/Hillshade). Finalmente, la simbolización se ha realizado en el CAD MicroStation (Figura 41).

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL ALCANCE DE LOS DESPRENDIMIENTOS

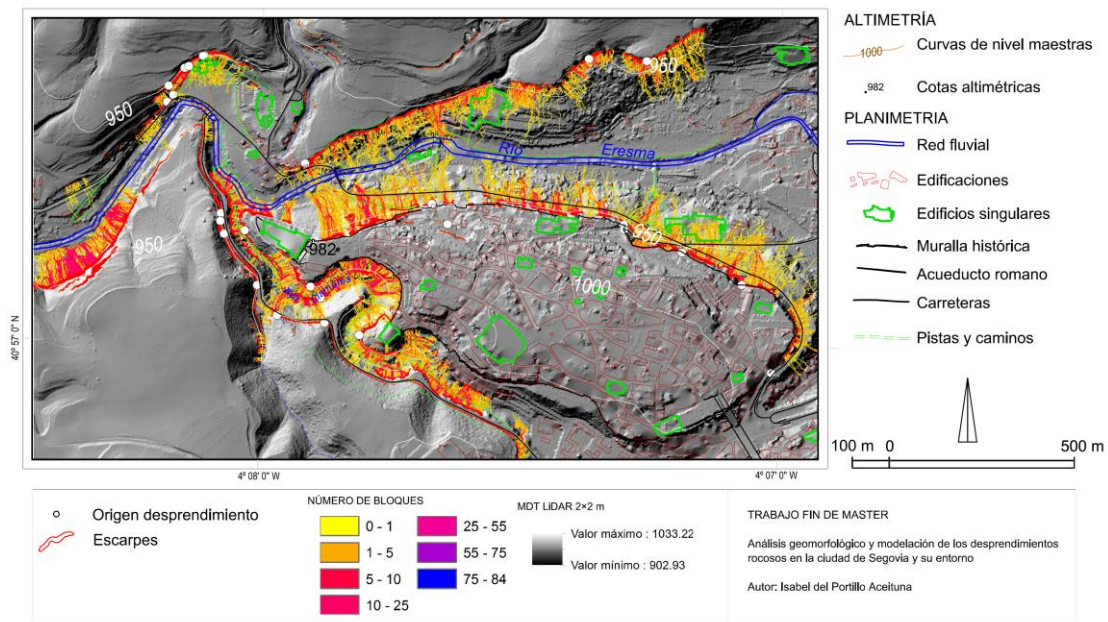


Figura 41. Mapa de susceptibilidad al alcance de los desprendimientos con $d1 = 0,30$. Nota: En el anexo cartográfico se incluye una versión ampliada del mapa, así como unas vistas 3D de las áreas más afectadas.

b) Mapa de susceptibilidad empleando como tamaño medio de los bloques: $d1$

(height) = 0,70 m, $d2$ (width) = 0,53 y $d3$ (length) = 0,30 m, modificando el eje los bloques (Figura 42).

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL ALCANCE DE LOS DESPRENDIMIENTOS

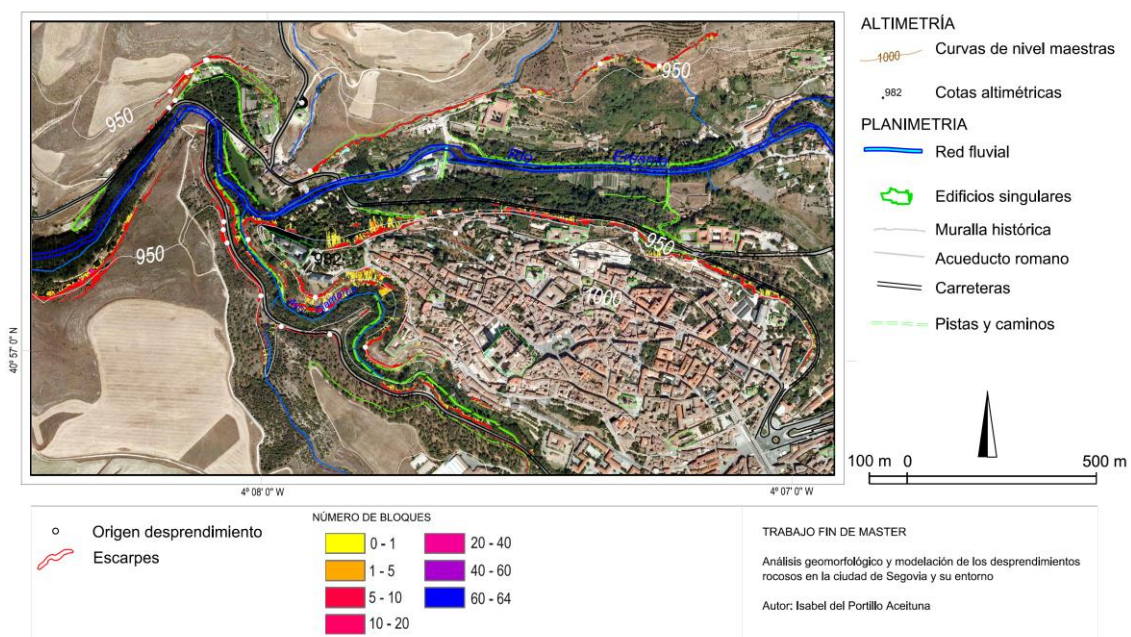


Figura 42. Mapa de susceptibilidad al alcance de los desprendimientos con $d1 = 0,70$. Nota: El anexo cartográfico se incluye una versión ampliada del mapa.



El resultado de esta segunda simulación muestra una menor movilización de los bloques. Al ser bloques rectangulares pero con una mayor longitud del eje mayor ofrecen una mayor superficie de contacto, puede ocurrir, entonces, que al desprenderse y caer sobre el talud, prácticamente queden detenidos al pie de los escarpes. Si en el impacto se rompe, y genera bloques más o menos similares en los tres ejes, si podría comenzar a rodar y movilizarse a una mayor distancia.

En todo caso, la interpretación de ambos mapas permite tener una primera aproximación de las áreas geográficas que muestran una mayor densidad en cuanto al fenómeno, así como las áreas que quedarían más expuestas. Así por ejemplo, se aprecia una alta densidad de desprendimientos en los taludes de gravedad que enmarcan el área del Abrigo del Molino situado al Oeste del área de estudio. También los taludes de la muralla en su parte Norte, bordeando el Alcázar de la ciudad y siguiendo el curso del arroyo Clamores, así como las áreas afectadas por deslizamientos y conos de deyección antiguos. La superposición del entramado urbano, destacando los edificios singulares algunas sendas o paseos, la carretera, permite detectar algunas áreas de riesgo específico.

En primer lugar, se encuentra el yacimiento arqueológico del Abrigo del Molino que está completamente expuesto al fenómeno de los desprendimientos, y, además se emplaza en uno de los lugares, donde la simulación registra mayor densidad de desprendimientos. El Santuario de Nuestra Señora de La Fuencisla, se sitúa al pie de paredes o escarpes de gran desnivel, y donde en los últimos años han ocurrido al menos siete desprendimientos. La carretera CL-607 (Carretera de Arévalo) próxima al Santuario, también ha sufrido desprendimientos y en las simulaciones se aprecia como las trayectorias de los bloques atraviesan la misma.

Otro foco susceptible a los desprendimientos es la senda, bastante concurrida, que transcurre a lo largo del arroyo Clamores; en ella se ve como la densidad y trayectoria de alcance es muy elevada, así como los edificios singulares aledaños, el Alcázar, la Casa de La Química y la propia muralla, asentada sobre los propios escarpes y en taludes. En la parte Norte de la muralla se ve como las trayectorias de alcance son altas y afectan directamente a bienes (la Casa de la Moneda, la muralla con sus puertas – Puerta de San Cebrián y Santiago–, el Convento de Santa Cruz, el Campus de la IE



University, alojado en el Convento de Santa Cruz La Real y la trasera del colegio Fray Juan de la Cruz) y a carreteras, ya que todo el Paseo de Santo Domingo de Guzmán está invadido por los desprendimientos, así como las calles próximas a la muralla.

La calle Marqués de Villena, que lleva hasta el Monasterio de Santa María del Parral, es una zona muy susceptible como queda reflejado en los mapas, ya que hay una serie de taludes de gravedad que enlazan con los conos de deyección y los deslizamientos. Finalmente, una carretera muy afectada por los desprendimientos es la calle o carretera SG-312 “Cuesta de los Hoyos”, con seis desprendimientos inventariados pero que en este caso el resultado no ha sido el esperado, pues las trayectorias apenas tocan la carretera, es decir, que la simulación no ha funcionado igual en todos los escarpes a pesar de tener constancia de los frecuentes cortes de tráfico que se producen por los desprendimientos. Posiblemente el enlace directo entre el escarpe con la carretera, que se ha considerado en las simulaciones, indicaría que los rocas quedarían sobre la propia carretera.

En resumen, como se ha dicho, se trata de una primera aproximación al fenómeno de los desprendimientos en el entorno de la ciudad histórica de Segovia y sería necesario probar con otros parámetros y considerar en futuros trabajos la vegetación.

No obstante, los resultados obtenidos confirman las áreas de mayor riesgo asociadas a la dinámica gravitacional en el entorno de Segovia, establecidas en 1993 por Díez-Herrero y Martín Duque, quienes diferencian cinco grandes conjuntos de susceptibilidad (Figura 43). Si comparamos los resultados de este TFM con dichos estudios, vemos que las áreas de mayor densidad de desprendimientos se corresponden con las áreas de susceptibilidad alta y media en taludes de gravedad, deslizamientos y laderas.

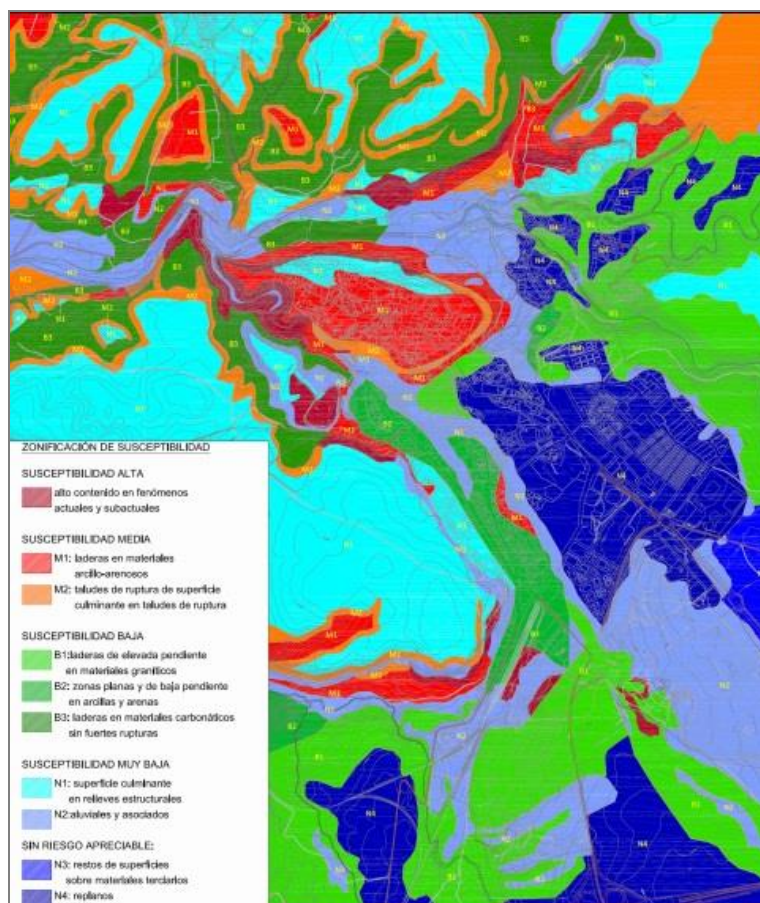


Figura 43. Mapa de zonificación de susceptibilidad en el entorno de Segovia. Mapa original Díez-Herrero y Martín-Duque, 1993, modificado y presentado en las Directrices de Ordenación de Ámbito Subregional de Segovia y su Entorno (DOTSE).

Capítulo VI: Conclusiones



El estudio de los de los desprendimientos de rocas llevado a cabo en este TFM, ha permitido avanzar en el conocimiento de uno de los procesos gravitacionales que más afectan en la ciudad de Segovia y su entorno, en especial en determinar sus características litológicas, morfotopográficas y meteorológicas. Asimismo, se presentan como resultado principal varios mapas que muestran la susceptibilidad al alcance de los desprendimientos mediante la simulación de los mismos. De igual modo se ha avanzado en la representación cartográfica de mapas temáticos, como ha sido el ensayo de simbolización y diseño del mapa geológico y geomorfológico.

En conjunto, el análisis y reconocimiento de los desprendimientos permite extraer una serie de conclusiones:

- a) La realización de un inventario señalando el punto de origen de los desprendimientos en un Sistema de Información Geográfica, ha permitido tener un registro con información geográfica (altitud, pendientes, orientación, etc.) y litológica para cada desprendimiento, así como su localización espacial a través de sus coordenadas x y z . Esta base de datos es sencilla de actualizar y podría facilitar el seguimiento de los desprendimientos futuros.
- b) El análisis de los factores condicionantes esclarece la incidencia de cada factor en la ocurrencia de los desprendimientos. Los desprendimientos ocurren, principalmente, en escarpes constituidos por dolomías y areniscas dolomíticas sobre pendientes superiores a los 44° , y en orientaciones predominantemente norte y sureste. Las características geomorfológicas del área de estudio constituyen un factor importante, derivado del modelado de valles de tipo cañón, con vertientes típicas de escarpe-talud. Los fuertes desniveles entre la culminación de los escarpes y los fondos de valle favorecen el proceso de desprendimientos.
- c) Los factores meteorológicos estudiados para tres eventos recientes ha mostrado que los ciclos de hielo pueden tener una incidencia a tener en cuenta como factor desencadenante. Especialmente, el desprendimiento ocurrido en el santuario de la Fuencisla estuvo precedido de unas



temperaturas mínimas muy bajas ($-13,2^{\circ}\text{C}$), unido a apreciables precipitaciones que posibilitarían una eficaz crioclastia.

- d) El uso de tres Modelos Digitales de Elevación obtenidos desde fuentes diversas y con distinta resolución (MDE-MTN-5000 y MDE-LiDAR 5x5 m, con una resolución de 5 m, MDE-LiDAR 2x2 m, con una resolución de 1 m) ha arrojado sensibles diferencias en cuanto a los valores de pendiente y orientación de cada punto-origen de cada desprendimiento, que también se han puesto de manifiesto al obtener las estadísticas de estas variables mediante un buffer de 5 m a cada punto-origen. En todo caso, esta aproximación con los MDE ha permitido establecer el umbral de pendiente que define el área-fuente o potencial de los desprendimientos. A partir de los tres MDE utilizados se ha podido comprobar que la resolución que ofrece el vuelo fotogramétrico digital con vuelo LiDAR de 2×2 metros es muy precisa y útil para estudios de detalle como el establecimiento del origen de los desprendimientos a una escala local. No obstante, este MDE ofrece algunos problemas derivados de la dificultad de obtener con precisión la superficie topográfica, que debe realizarse mediante procesos de limpieza o filtro de los retornos de cada superficie. En este sentido, sería interesante, en futuros trabajos, llevar a cabo la simulación con los MDE con resolución de 5 m, y comparar los resultados con el MDE-LiDAR, debido a las diferencias encontradas entre ellos con relación a la pendiente y orientación.
- e) La simulación de los desprendimientos, realizada en este TFM con el programa Rockyfor3D, ha permitido obtener una primera prospección de las áreas prioritarias a la susceptibilidad al alcance de los desprendimientos de rocas en el entorno de Segovia. Los mapas muestran, asimismo, las áreas, bienes patrimoniales e infraestructuras (carreteras, paseos) que se encontrarían en riesgo específico. De igual modo, el mapa coincide con las zonas de riesgo alto detectadas en estudios previos (Díez-Herrero y Martín-Duque, 1993).
- f) Finalmente, los mapas de susceptibilidad al alcance de los desprendimientos tienen que considerarse como una primera aproximación, y sería necesario,



en futuros trabajos, ajustar los parámetros o propiedades requeridos por el programa (forma y tamaño de los bloques, tipo de suelo, rugosidad de la superficie, etc.) mediante trabajo de campo, y asimismo considerar la vegetación, dado que los taludes del entorno de Segovia están ocupados por abundante vegetación. De igual modo, corregir aquellos escarpes donde aparentemente la simulación no ha funcionado, como es el caso de algunos escarpes situados en la cuesta de los Hoyos.

- g) En conclusión, las TIG se han mostrado, en este TFM, como herramientas valiosas para llevar a cabo un análisis y modelación de un fenómeno natural, como los desprendimientos de rocas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayala-Carcedo, F.J. y Olcina, J (coord.) (2002).** Riesgos Naturales. Ed. Ariel, 1512 pp.
- Ayala-Carcedo, F.J., Domínguez, M.J.; Cubillo Nielsen, S., Álvarez, A.; Laín, L., González, A., Laín, R., y Ortíz, G. (2003).** Mapas de susceptibilidad al alcance por desprendimientos rocosos graníticos. Sistema Central Español, Sierra de la Cabrera (Madrid), Escala 1:5.000. En.: F. J. Ayala-Carcedo y J. Corominas, (eds.). Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España, Instituto Geológico y Minero de España, 97-118.
- Alcántara, I. 2000.** Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología, investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM, 41: 7-25.
- Andrés, N., Tanarro, L.M., Palacios, D. (2010).** Aplicaciones de los SIG al estudio de amenazas naturales asociadas al retroceso de glaciares y desprendimientos. Ciudad y territorio, estudios territoriales, vol. XLII, nº 165-166, 529-559 pp.
- Bullón, T. (1986).** El contacto segoviano entre la cuenca del Duero y la sierra de Guadarrama. En: E. MARTÍNEZ DE PISÓN & B. TELLO (Coords.). Atlas de Geomorfología. Alianza, Madrid, 137-146 pp.
- Coe, J., A., Harp, E. L., Tarr, A.r C., and Michael, J. A. (2005).** Rock-fall hazard assessment of Little Mill Campground, American Fork Canyon, Uinta National Forest, Utah; 2005 Open-File Report; 2005-1229. Dirección URL: [<https://pubs.usgs.gov/of/2005/1229/>]
- Corominas, J. (1989).** Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. En J. COROMINAS (Ed). Estabilidad de taludes y laderas inestables. Monografía nº 3. Sociedad Española de Geomorfología, 1-30 pp.
- Díez-Herrero, A. (1999).** Recomendaciones para la prevención del riesgo de desprendimientos en el parque periurbano del Valle del Clamores (Segovia). Serie Informes Técnicos sobre Riesgos Naturales, 1. Servicio de Parques y Jardines del Excmo. Ayuntamiento de Segovia y Universidad S.E.K.
- Díez-Herrero, A., (2000).** Informe técnico sobre los hundimientos acaecidos en la Cuesta de Santa Lucía en el mes de noviembre de 2000. Serie Informes Técnicos sobre Riesgos Naturales, 2. Servicio de Parques y Jardines del Excmo. Ayuntamiento de Segovia y Universidad S.E.K.
- Díez-Herrero, A. y Martín-Duque, J.F. (1993).** Fenómenos gravitacionales en el entorno de la ciudad de Segovia. Análisis de riesgos y aplicación a la ordenación territorial. En: R. Ortiz Silla (Ed.), Problemática Geoambiental y Desarrollo, pp. 681-692, Sociedad Española de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Murcia.
- Díez-Herrero, A. y Martín-Duque, J.F. (2005).** Las raíces del paisaje: condicionantes geológicos del territorio de Segovia. Junta de Castilla y León, Valladolid, 461 págs.
- Díez-Herrero, A.; Laín, L.; Martín-Duque, J.F.; Sacristán, N.; y Vicente, F. (2011).** A todo riesgo V. Convivir con los desastres geológicos cotidianos. Guión de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2011. IGME, UCM-IGeo, Universidad de Valladolid y UNED, Madrid-Segovia, 68 pp.
- Díez-Herrero, A.; Baillo, R., Garrote, J.; Gutiérrez (4), I.; Lain, L.; Mancebo, M.J.; Martín-Duque, J.F. y Pérez, F.L. (2012):** Propuesta para la calibración y validación de los análisis y cartografías de peligrosidad y riesgos naturales mediante el estudio de eventos recientes. En: A.

González Díez (Coord). Avances de la geomorfología en España 2010-2012. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología: Santander, 17-20 septiembre de 2012.

Díez-Herrero, A.; García, E.; Laín, L.; Martín-Duque, J.F.; Martín, C.; Sacristán, N.; y Vicente, F. (2016). A todo riesgo IX. Convivir con los desastres geológicos cotidianos. Guión de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2015. IGME y UNED, Madrid-Segovia, 74 pp.

Dikau, R.; Schrott, L. y Dehn, M. (1997). Topple. En: R. DIKAU, D. BRUNSDEN, L. SCHROTT & M.L. IBSEN (Eds). Landslide Recognition. John Wiley & Sons, New York; pp: 29-41.

Dorren L.K.A., 2015. Rockyfor3D (v5.2) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper (www.ecorisq.org): 32 p.

Ferrer, M. (1988). Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas. En: Riesgos geológicos. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Geología ambiental pp. 175-192. Madrid, IGME 1988. ISBN: 84-505-7599-0.

FGDC (2006). Federal Geographic Data Committee [prepared for the Federal Geographic Data Committee by the U.S. Geological Survey], 2006, FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization: Reston, Va., Federal Geographic Data Committee Document Number FGDC-STD-013-2006, 290 p., 2 plates.

Flageollet, J.C. y Weber, D. (1997): Fall. En: R. DIKAU, D. BRUNSDEN, L. SCHROTT & M.L. IBSEN (Eds). Landslide Recognition. John Wiley & Sons, New York; 13-28 pp.

García, A. [on-line]. Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación. Universidad de Granada. Dirección URL:
[<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>]

González, L. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación, 744 págs.

IGME (2007). Procedimiento de digitalización de cartografía MAGNA 1:50.000. Mapa Geológico. Mapa Geomorfológico. Mapa de Procesos Activos. Instituto Geológico y Minero de España.

Keller A. K. y Blodgett R. H. (2004). Riesgos naturales: procesos de la tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Ed. Pearson, 422 pp.

Martínez, E. (1976). Segovia. Evolución de un paisaje urbano. Madrid. Colegio de Ingenieros Caminos, Canales y Puertos.

Muñoz, J. (1992). Geomorfología General. Ed. Síntesis. Madrid.

Orozco, M.T., Pérez-Cerdán, F. y González, M.L. (2013). Librería de símbolos MAGNA.STYLE. Informe Técnico. Infraestructura Geocientífica y Servicios. Sistemas de Información Geocientífica (IGSSIG). Instituto Geológico y Minero de España.

Peña, J.L.; Pellicer, F.; Chueca, J. y Julián, A. (1997). Leyendas para mapas geomorfológicos a escalas 1:100.000/1:200.000 y 1:25.000/1:50.000. En: J.L. PEÑA MONNÉ (Ed). Cartografía Geomorfológica Básica y Aplicada. Geoforma Ediciones, Logroño, 127-143 pp.

Pérez-Cerdán, F., Orozco, M.T. y González, M.L. (2012). Especificaciones para la digitalización de la Cartografía Geológica MAGNA en formato digital. Informe Técnico 2012_001. Infraestructura Geocientífica y Servicios. Sistemas de Información Geocientífica (IGSSIG). Instituto Geológico y Minero de España.

Sanz, C. (1988). El relieve del Guadarrama Oriental. Comunidad de Madrid. Consejería de Política Territorial. Madrid, 547 págs.

Stock, G. M., Luco, N., Collins, B. D., Harp, E. L., Reichenbach, P., and Frankel, Kurt L. (2014): Quantitative rock-fall hazard and risk assessment for Yosemite Valley, Yosemite National Park, California: Scientific Investigations Report. Dirección URL [<https://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20145129>].

Tanarro, L.M., Corona, C., Stoffel, M. Lucia, A., Ballesteros J.A. y Trappmann D. (2013). Do highly resolved DEMs improve the quality of rockfall model output? - A case study from Central Spain. 8th International Conference on Geomorphology (Session: Methods in Geomorphology including: / S26C - DEMs, GIS and spatial analysis). 27-31 August 2013, Paris, France.

Tanarro, L.M.; Díez-Herrero, A. y Martín-Duque, J. F. (2010). Cañones y hoces del borde norte de las sierras de Guadarrama, Somosierra y Ayllón. En: J.A. Ortega y J.J. Durán (eds.). Patrimonio geológico: Los ríos en roca de la Península Ibérica. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Geología y Geofísica, nº 4, pp. 437-472.

Tanarro, L.M., Muñoz, J. (2012). Rock falls in the Duratón canyon, central Spain: Inventory and statistical analysis. Geomorphology, ISSN 0169-555X, vol. 169-170, pp. 17-29.

OTROS RECURSOS ABIERTOS CONSULTADOS

Agencia Estatal de Meteorología: Dirección URL: [<http://www.aemet.es/es/portada>]

Archivo de Planeamiento Urbanístico y Ordenación del Territorio, Junta de Castilla y León: Dirección URL [http://servicios.jcyl.es/PlanPublica/ldoc_files.do;jsessionid=37e9fc7a38b5ef4b9eeb299c1c203efa813b27320169a8fbf4194fac60f85dac.e34Kb3iMbN4KbOOLaxqSah4Schj0?cDocId=289173]

Ayuntamiento de Segovia: Dirección URL: [<http://www.segovia.es/>]

El Adelantado de Segovia: Dirección URL: [<http://www.eladelantado.com/>]

Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León: Dirección URL: [<http://www.cartografia.jcyl.es/>]

Instituto Geológico y Minero de España: Dirección URL: [<http://www.igme.es/>]

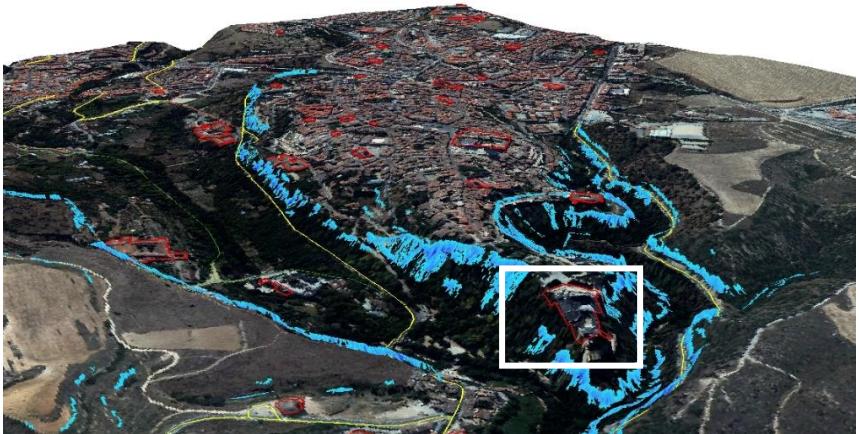
Instituto Geográfico Nacional: Dirección URL: [<http://www.ign.es/web/ign/portal>]

AGRADECIMIENTOS

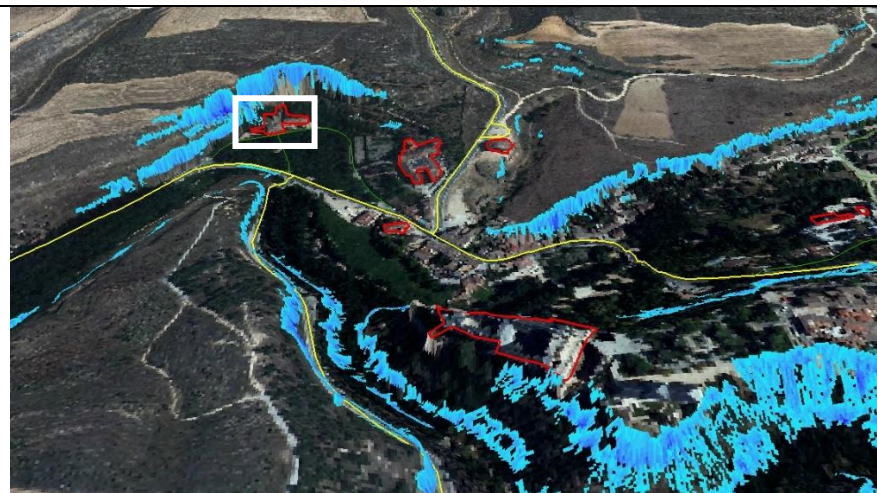
Quisiera agradecer a mi familia todo apoyo demostrado durante este trabajo, así como la oportunidad que me han dado para seguir estudiando.

Asimismo, quería dar las gracias a mis tutores: en especial a Luis Miguel Tanarro García, por su dedicación en este estudio, consejos, ayuda y mensajes de ánimo, y, a Andrés Díez Herrero, por su predisposición para unirse a este trabajo aportando material de utilidad, consejos y correcciones.

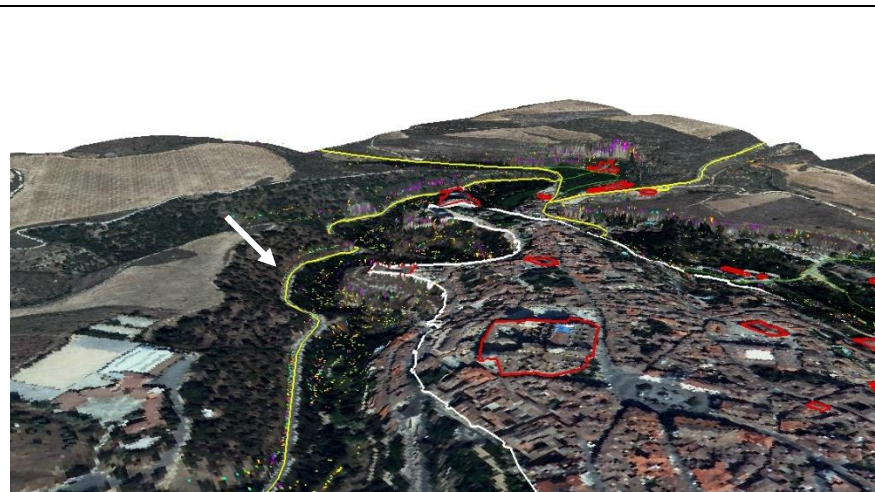
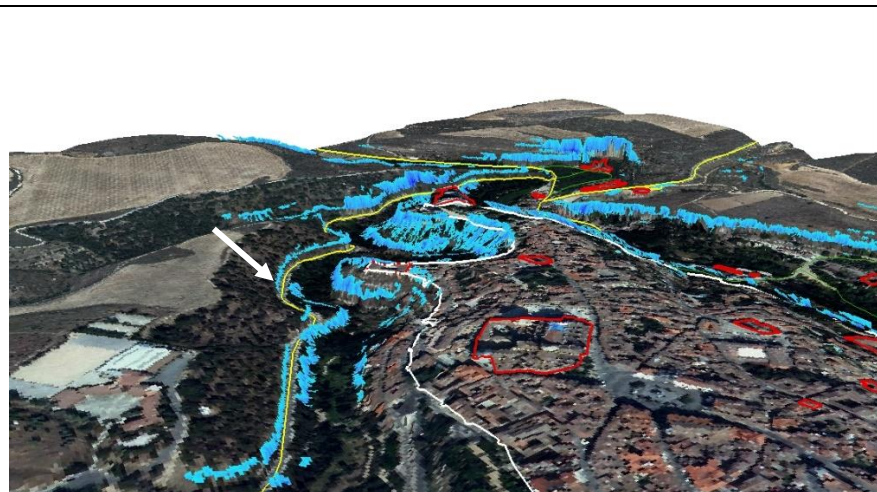
Anexo

VISTAS EN 3D DE CIERTAS ZONAS DE RIESGO ESPECÍFICO SELECCIONADAS	
Nr Passages	Nr Deposited
Alcázar de la ciudad (Edificio singular)	
	
Casa de La Química (Edificio singular), muralla y senda del arroyo Clamores	
	

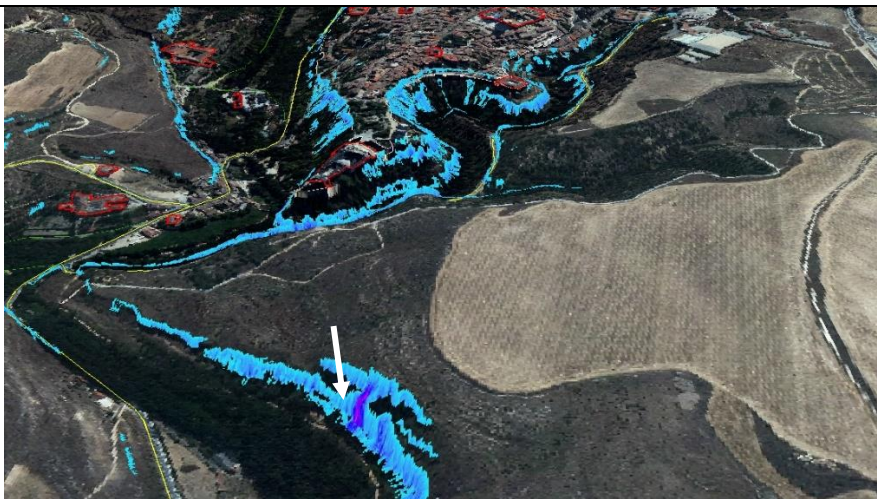
Santuario de Nuestra Señora de La Fuencisla (Edificio singular), pistas y carreteras próximas



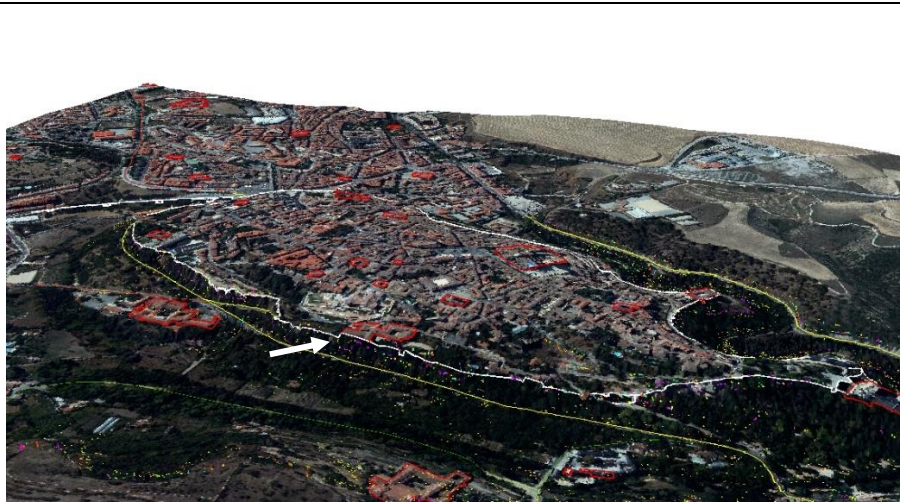
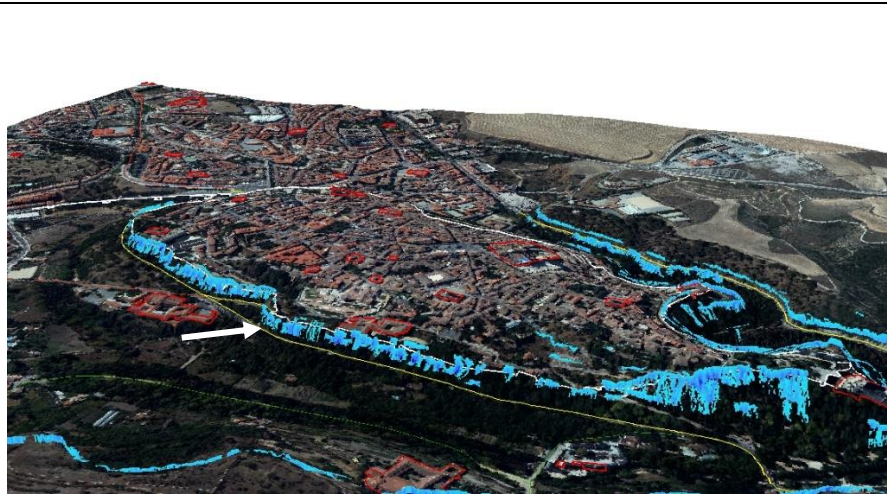
Taludes de la calle o carretera SG-312 “Cuesta de los Hoyos”



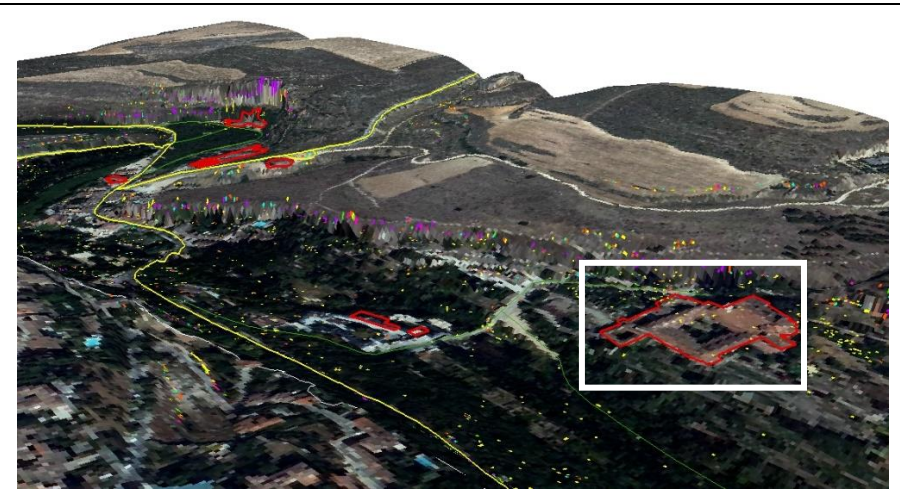
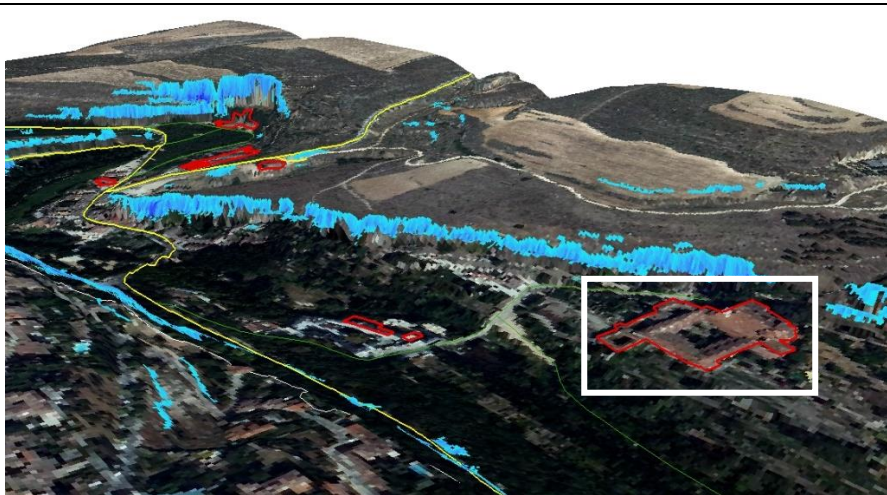
Yacimiento arqueológico Abrigo del Molino



Muralla y paseo de Santo Domingo



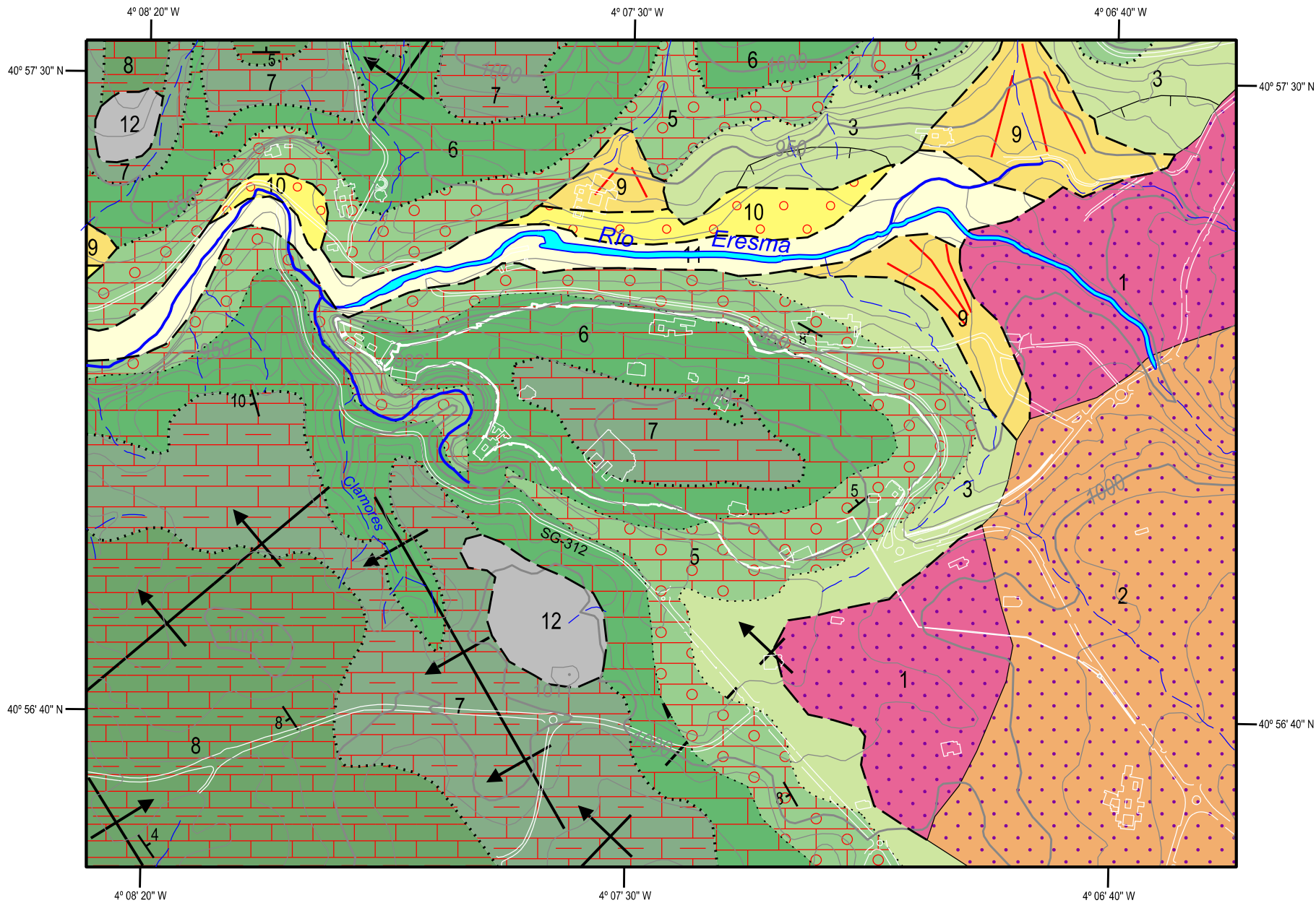
Monasterio de Santa María del Parral (Edificio singular), viviendas y CI/Marqués de Villena



Laderas escarpadas con gran número de desprendimientos



CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA DEL ENTORNO DE SEGOVIA



LEYENDA

CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO			
		12	11	10	9
		PLEISTOCENO			
MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	Campaniense	8	
			Santonense	7	
			Coniaciense	6	
			Turonense	3	
ROCAS ÍGNEAS PREHERCÍNICAS			2		
ROCAS GRANÍTICAS HERCÍNICAS			1		

UNIDADES GEOLÓGICAS
12. Antrópico.
11. Arenas, limos, gravas y cantos (aluviales. Fondos de valles).
10. Gravas, arenas y limos (Terrazas).
9. Bloques, cantos y arenas (Cono de deyección).
8. Dolomías, margas y arcillas. Fm. "Dolomías y margas de VALLE DE TABLADILLO".
7. Margas, dolomías y areniscas. Mb. "Dolomías de MONTEJO". Fm. "Calizas y dolomías de CASTROJIMENO".
6. Areniscas con cemento dolomítico. Mb. "Areniscas dolomíticas de HONTORIA". Fm. "Calizas y dolomías de CASTROJIMENO".
5. Arenas pardas, areniscas y arcillas. Mb. "Areniscas y arcillas de HONTORIA". Fm. "Dolomías tableadas de CABALLAR".
4. Dolomías tableadas, margas y arcillas. Mb. "Dolomías tableadas de CABALLAR". Fm. "Idem".
3. Arenas, arcillas y gravas. Fm. "Arenas y arcillas de SEGOVIA".
2. Ortoneises glandulares mesócratos-melanócratos.
1. Adamellitais-Granodioritas con gabarros.

ALTIMETRÍA
— 1000 — Curvas de nivel maestras
• 982 • Cotas altimétricas

PLANIMETRÍA
— Red fluvial
— Edificios singulares
— Muralla histórica
— Acueducto romano
— Carreteras

SIGNOS CONVENCIONALES
..... Contacto normal o concordante
— — Contacto por discordancia
— — Contacto intrusivo

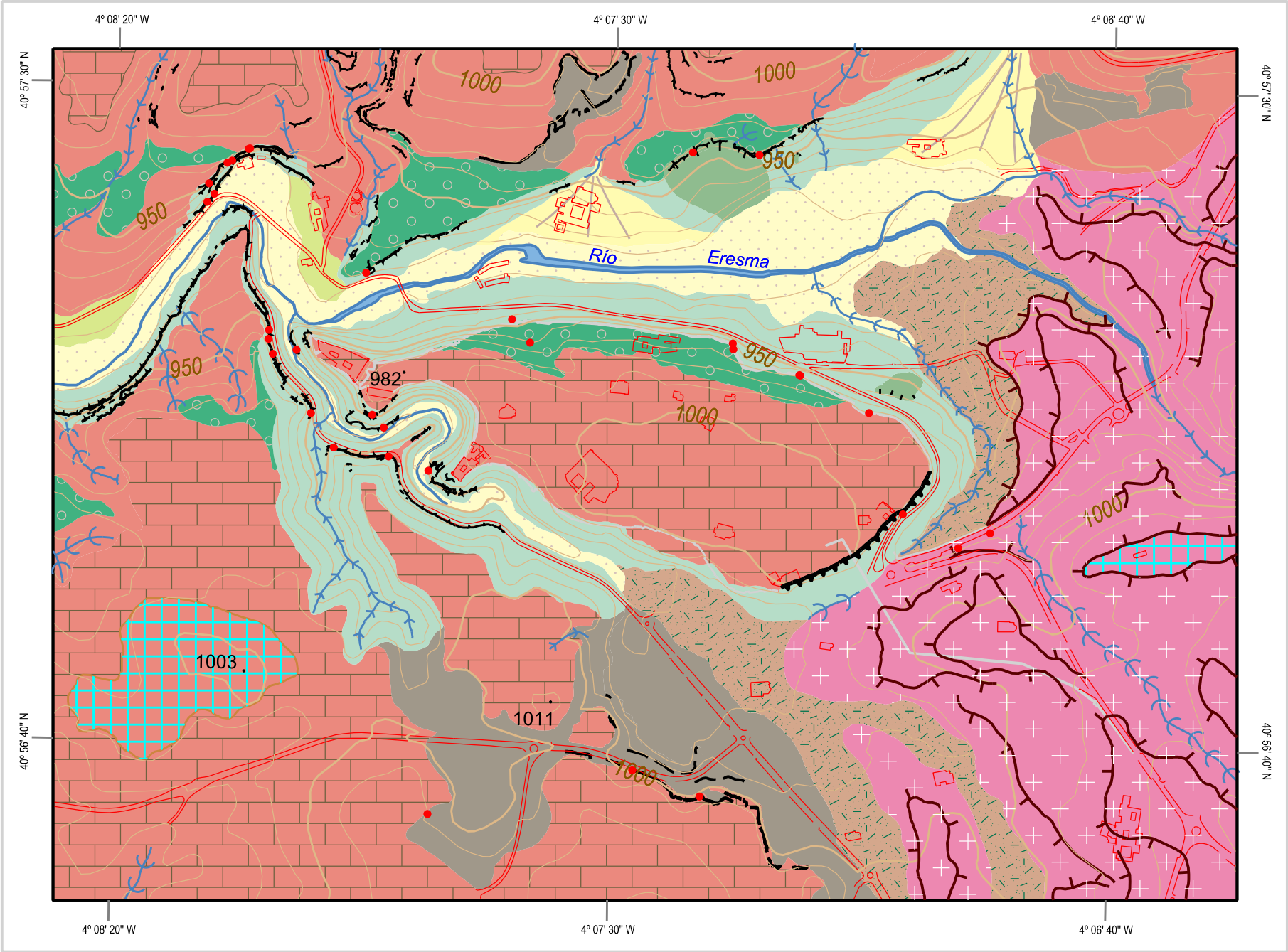
TRAZA AXIAL DE LOS PLIEGUES ALPINOS
+ + Pliegues monoclinales alpinos o fallas con inclinación del labio hundido
— — Estratificación con indicación de la dirección y cantidad de buzamiento
▼ Foliación principal
— — Deslizamiento

TRABAJO FIN DE MASTER
Análisis geomorfológico y modelación de los desprendimientos rocosos en la ciudad de Segovia y su entorno
Autor: Isabel del Portillo Aceituna

FUENTES
Instituto Geológico y Minero de España
Instituto Geográfico Nacional

100 m 0 500 m

CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA DEL ENTORNO DE SEGOVIA



LEYENDA

ALTIMETRÍA

- Curvas de nivel maestras
- Cotas altimétricas

PLANIMETRÍA

- Edificios singulares
- Muralla histórica
- Acueducto romano
- Carreteras

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

- Relieves estructurales sobre calizas y dolomías
- Vertientes-glaciales de degradación del "pediment" sobre rocas cristalinas
- Complejo aluvial (lecho de inundación actual)
- Complejo aluvial-coluvial

ELEMENTOS ESTRUCTURALES

- Escarpe estructural en capas monoclinales

Rellanos y culminaciones poligénicas

- Residuos de superficie

- Origen desprendimientos

Elementos fluviales y asociados

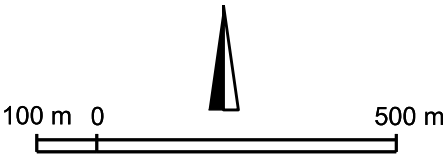
- Canales fluviales
- Encajamiento en gargantas
- Valles de fondo plano o en artesa
- Valles en cuna o fondo cóncavo
- Terraza erosiva de encajamiento
- Terrazas
- Conos de deyección
- Rellanos articulados tipo glacis

Elementos gravitacionales y mixtos

- Escarpes principales
- Escarpes secundarios
- Taludes de gravedad
- Laderas regularizadas
- Deslizamientos rotacionales

Elementos antrópicos

- Graveras y canteras y vaciados mineros



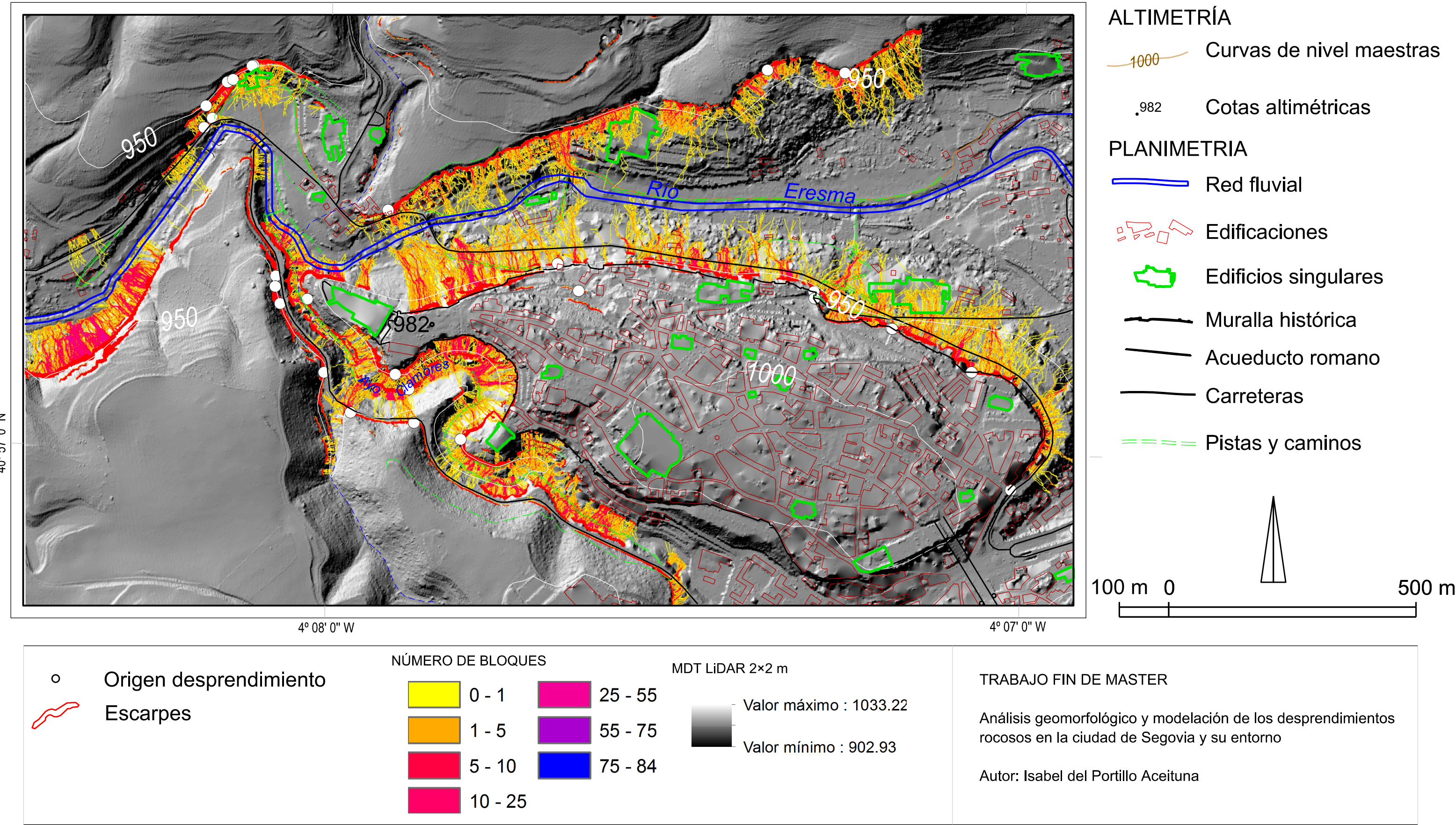
TRABAJO FIN DE MASTER

Análisis geomorfológico y modelación de los desprendimientos rocosos en la ciudad de Segovia y su entorno

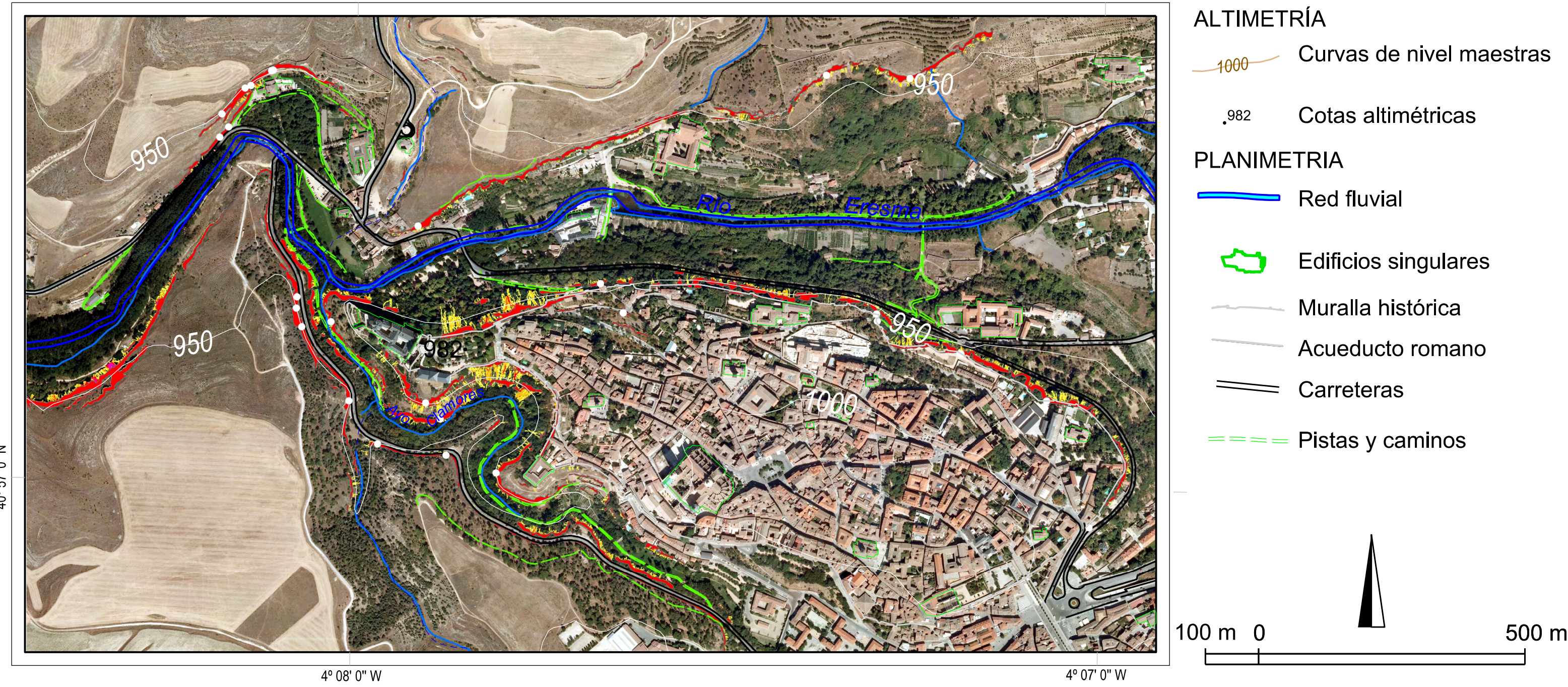
Autor: Isabel del Portillo Aceituna

FUENTE:
Mapa base Díez-Herrero y Martín Duque, 1993b

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL ALCANCE DE LOS DESPRENDIMIENTOS



MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL ALCANCE DE LOS DESPRENDIMIENTOS



○ Origen desprendimiento

Escarpes

NÚMERO DE BLOQUES

0 - 1	20 - 40
1 - 5	40 - 60
5 - 10	60 - 64
10 - 20	

TRABAJO FIN DE MASTER

Análisis geomorfológico y modelación de los desprendimientos rocosos en la ciudad de Segovia y su entorno

Autor: Isabel del Portillo Aceituna